

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE FÍSICA



PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE CURSO

CIRCUITOS ELÉTRICOS DE CORRENTE ALTERNADA E A PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Aluno: Eduardo de Poli

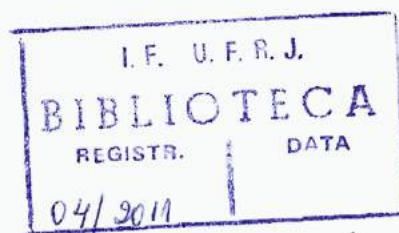
Orientadora: Maria Antonieta Teixeira de Almeida

Banca: Marcos Binderly Gaspar

Vitorvani Soares

Walter Issamu Suemitsu

Novembro 2011



AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Arnaldo de Poli pelo suporte, bons conselhos na hora certa e paciência por todo este tempo de graduação e Teresa de Poli, sou grato a ela que sempre esteve lá para me aconselhar, me guiando para trilhar por bons caminhos e não desistir dos meus objetivos.

A minha irmã Mariane de Poli, que sempre acreditou em meu potencial, me incentivou, me ensinou e está sempre ao meu lado disposta a me ajudar. Aos meus amigos em especial, Victor Hugo Martins Bello Honaiser, pelos momentos vividos.

Agradeço ao Grupo de Conjuntura da UFRJ, e particularmente à Prof.^a Maria Antonieta Teixeira de Almeida, pelas experiências enriquecedoras durante o período de extensão. Agradeço em especial ao Dr. Walter Issamu Suemitsu pela contribuição inestimável para a confecção desta monografia e também ao Agostinho Mendes Cunha pela dedicação de várias horas de seu trabalho para colaborar de forma intensa nas gravações dos vídeos que acompanham esta monografia.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é discutir de forma qualitativa a produção e a transmissão de energia elétrica. Com esta finalidade foi apresentada uma revisão dos circuitos de corrente contínua e alternada. Acompanha esta monografia um DVD contendo vídeos com circuitos em série com resistores, capacitores e indutores submetidos a ondas quadradas e senoidais.

Esta monografia foi organizada da seguinte forma: nos capítulos 1 e 2 foram revistos os conceitos associados a correntes contínuas e alternadas, no capítulo 3 foi discutida a produção de energia elétrica, no capítulo 4 a transmissão de energia elétrica e no apêndice 1 está o questionário de avaliação associado aos vídeos produzidos.

Palavras chaves: potência; corrente alternada; potência reativa; potência ativa, corrente contínua; capacitor; indutor; resistência; voltagem; transmissão de energia elétrica; produção de energia elétrica;

Sumário

INTRODUÇÃO	6
CAPÍTULO 1 – CORRENTE CONTÍNUA.....	7
1.1) CORRENTE ELÉTRICA.....	7
1.2) POTÊNCIA ELÉTRICA	7
1.3) ELEMENTOS UTILIZADOS EM CIRCUITOS.....	9
1.3.1) RESISTORES	9
1.3.2) LEI DE OHM	9
1.4) EFEITO JOULE	9
1.5) A FORÇA ELETROMOTRIZ (<i>f.e.m</i>)	10
1.6) GERADOR E RECEPTOR DE CORRENTE ELÉTRICA.....	14
1.7) POTÊNCIA FORNECIDA POR UMA FONTE.....	15
CAPÍTULO 2 – CORRENTE ALTERNADA	16
2.1) DEFINIÇÃO DE CORRENTE ALTERNADA.....	16
2.1.1) EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	17
2.2) REPRESENTAÇÃO FASORIAL DE UMA FUNÇÃO HARMÔNICA	18
2.2.1) REPRESENTAÇÃO FASORIAL DAS VOLTAGENS EM UMA ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE.....	19
2.3) VOLTAGEM PICO-A-PICO.....	20
2.4) VOLTAGEM NOS TERMINAIS DE UM RESISTOR E A SUA DIFERENÇA DE FASE COM A CORRENTE ELÉTRICA	21
2.5) VOLTAGEM NOS TERMINAIS DE UM CAPACITOR E A SUA DIFERENÇA DE FASE COM A CORRENTE ELÉTRICA.....	22
2.5.1) O QUE É UM CAPACITOR.....	22

2.5.2) CAPACITOR EM CIRCUITO CA.....	23
2.6) VOLTAGEM NOS TERMINAIS DE UMA BOBINA (INDUTOR) E A SUA DIFERENÇA DE FASE EM RELAÇÃO CORRENTE ELÉTRICA.....	25
2.6.1) INDUTOR EM CIRCUITO DE CORRENTE ALTERNADA.....	26
2.7) POTÊNCIA EM CORRENTE ALTERNADA.....	27
2.7.1) VOLTAGEM EFICAZ E POTÊNCIA MÉDIA OU ATIVA EM UM RESISTOR:.....	27
2.7.2) CORRENTE EFICAZ	30
2.7.3) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA E MÉDIA EM UM INDUTOR.....	31
2.7.4) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA E MÉDIA EM UM CAPACITOR	32
2.8) O CIRCUITO RLC	34
2.8.1) POTÊNCIA MÉDIA EM UM CIRCUITO RLC EM SÉRIE	36
2.9) CIRCUITO RLC EM PARALELO	39
2.10) REPRESENTAÇÃO COMPLEXA DA CORRENTE, DA VOLTAGEM E DA POTÊNCIA.....	41
2.11) SISTEMA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICO	42
2.12) INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO....	46
CAPÍTULO 3 – PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	48
3.1) INTRODUÇÃO.....	48
3.1.1) INDUÇÃO EM UMA ESPIRA PLANA EM ROTAÇÃO NUM CAMPO UNIFORME	49
3.1) GERADORES.....	51
3.1.1) GERADOR MONOFÁSICO.....	51
3.1.1) GERADOR TRIFÁSICO.....	53

CAPÍTULO 4 – TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	54
4.1) INTRODUÇÃO.....	54
4.2) TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	55
4.2.1) TRANSFORMADORES	56
4.3) A ESTRUTURA DA REDE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	57
4.3.1) NÍVEL DE DISTRIBUIÇÃO	59
4.3.2) NÍVEL DE SUB-TRANSMISSÃO	59
4.4) CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DA REDE.....	60
4.4.1) CARACTERÍSTICAS DA CARGA.....	65
4.4.2) DEPENDÊNCIA DA CARGA COM TENSÃO E FREQUÊNCIA.....	67
4.4.3) O BALANÇO DA POTÊNCIA ATIVA E SEUS EFEITOS SOBRE A FREQUÊNCIA DO SISTEMA.....	69
4.4.4) MECANISMO CARGA-FREQUÊNCIA.....	70
4.4.5) O BALANÇO DA POTÊNCIA REATIVA E SEU EFEITO SOBRE A TENSÃO DO SISTEMA	71
4.5) DESVANTAGENS NA TRANSMISSÃO DE ENERGIA EM CORRENTE ALTERNADA A ALTAS VOLTAGENS.....	74
4.5.1) EFEITO CORONA	74
4.5.2) EFEITO PELICULAR	75
4.6) TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA VOLTAGEM... 77	
4.6.1) VANTAGENS DA TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA VOLTAGEM	77
CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
APÊNDICE	80

INTRODUÇÃO

As Leis de diretrizes do Ensino Básico e Fundamental apontam para um ensino de ciências contextualizado. Estas diretrizes estão claras no seguinte parágrafo dos Parâmetros Curriculares Nacionais.

“o aprendizado se expande para fora de assuntos puramente científicos, como avaliar o caráter ético do conhecimento científico e tecnológico, avaliar o papel do desenvolvimento tecnológico, compreender aparatos tecnológicos e seu impacto na vida social e assim por diante. Isso requer participação ativa e compreensão da complexidade do mundo em transformação”.

O mundo moderno é movido a energia elétrica. Os moradores das cidades convivem diariamente com televisores, aparelhos de DVD, computadores dentre outros. Por isto é importante que eles entendam como a energia elétrica é produzida e como ela é transportada até a sua residência. Existe no tema quatro do PCN+ uma recomendação clara sobre a necessidade de abordagem destes temas: “equipamentos elétricos e telecomunicações (unidades temáticas: aparelhos elétricos, motores elétricos, geradores, emissores e receptores)”.

O transporte de energia elétrica desde as usinas produtoras de energia até os centros consumidores é realizado através de linhas de transmissão que são percorridas por correntes elétricas. As correntes elétricas utilizadas nas linhas de transmissão podem ser contínuas ou alternadas. Por isto para entender de forma qualitativa o processo de transmissão de energia elétrica faremos um revisão dos conceitos associados à corrente elétrica e a distribuição de energia em circuitos com corrente alternada e corrente contínua. O desenvolvimento de conceitos associados às correntes alternadas requer o conhecimento de cálculo diferencial e integral que não é apresentado no ensino médio. Com a finalidade de contornar este problema, foram desenvolvidos oito vídeos onde alguns destes conceitos podem ser visualizados e compreendidos sem cálculo diferencial e integral. Existe a possibilidade de utilizar os vídeos de forma quantitativa, uma vez que as medidas foram realizadas com um osciloscópio e multímetros digitais. No apêndice 1 deste trabalho foi colocada uma proposta de questionário com a finalidade de avaliar se o aluno compreendeu os conceitos discutidos nos vídeos. Fica a cargo de cada docente encontrar a forma mais adequada de integrar os vídeos na proposta pedagógica das suas aulas. Os vídeos estão à disposição de alunos e professores em forma de DVD e também poderão ser encontrados no site do YouTube.

Como no ensino médio, a discussão de corrente alternada está presente apenas nos currículos das escolas técnicas, onde há formação do técnico em eletrotécnica e eletrônica, este trabalho foi desenvolvido para estes alunos.

CAPÍTULO 1 – CORRENTE CONTÍNUA

1.1) CORRENTE ELÉTRICA

Quando existe um fluxo resultante de carga através de uma área qualquer, dizemos que há uma corrente através desta área. A quantidade de carga elétrica ΔQ que atravessa uma seção transversal do condutor em um determinado intervalo de tempo Δt determina a intensidade de corrente elétrica.

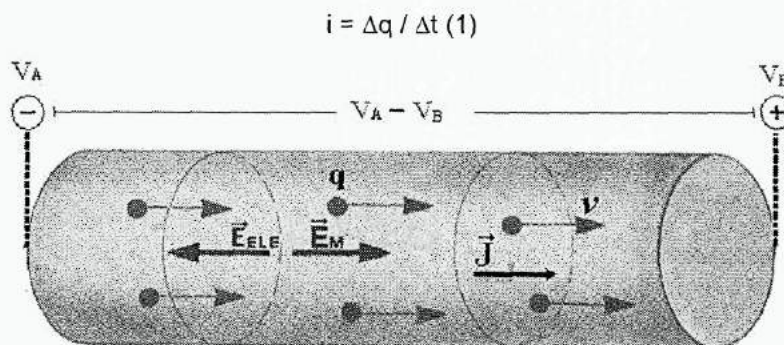


Figura 1

Sendo:

i = intensidade da corrente elétrica

ΔQ = quantidade de carga elétrica

Δt = intervalo de tempo

No passado, imaginava-se que as cargas elétricas que se movimentavam eram positivas. Por isto, o sentido das correntes elétricas representado nos circuitos elétricos era do movimento de cargas elétricas positivas. Hoje, sabemos que nos condutores metálicos as cargas que se movimentam são os elétrons. Logo a corrente elétrica verdadeira se refere ao movimento de cargas elétricas negativas no sentido contrário ao movimento das supostas cargas elétricas positivas. Todavia, utilizaremos a corrente com cargas elétricas positivas denominada corrente convencional, porque os resultados relacionados à distribuição de energia nos circuitos elétricos são iguais para a corrente convencional e para a corrente verdadeira.

1.2) POTÊNCIA ELÉTRICA

As cargas elétricas que transportam a corrente elétrica podem ganhar ou perder energia quando atravessam um elemento do circuito elétrico. Definimos o potencial elétrico associado a uma corrente que atravessa um elemento do circuito elétrico do ponto A para o ponto B da seguinte forma:

$$p_Q = \frac{\Delta U}{\Delta t}, \Delta U = U_B - U_A, (2)$$

onde U é a energia potencial elétrica associada às cargas elétricas da corrente elétrica. A expressão (2) mostra que quando as cargas elétricas da corrente elétrica perdem energia elétrica, esta energia foi fornecida para o elemento do circuito atravessado por esta corrente. Se este elemento é um aparelho elétrico, a energia perdida pelas cargas foi fornecida para o aparelho elétrico. Quanto maior for a quantidade de energia elétrica por unidade de tempo recebida pelo aparelho elétrico, maior será a potência do mesmo. Portanto, podemos concluir que potência elétrica é uma grandeza que mede a rapidez com que a energia elétrica que é fornecida para o aparelho elétrico é transformada em outra forma de energia.

A expressão (2) também mostra que quando a potência é positiva são cargas elétricas que recebem energia do elemento atravessado por ela.

Considere dois pontos A e B de um trecho do circuito, onde passa a corrente de intensidade i (ver Figura-2). Sejam V_A e V_B os respectivos potenciais elétricos dos terminais. Denominaremos a diferença de potencial $V_B - V_A$ de V_{BA} .

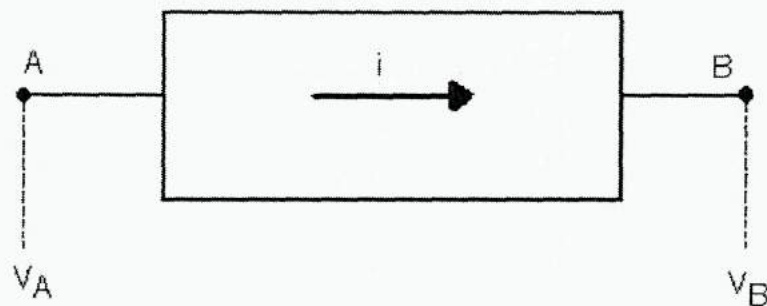


Figura 2

No ponto A, a carga tem energia potencial $U_A = \Delta q \cdot V_A$ e ao chegar em B ela tem energia potencial $U_B = \Delta q \cdot V_B$. Consequentemente, quando a carga elétrica atravessa o trecho AB, sofre a seguinte variação:

$$\Delta U = U_B - U_A = \Delta q \cdot V_B - \Delta q \cdot V_A = \Delta q \cdot (V_B - V_A) = \Delta q \cdot V_{BA}. (3)$$

Logo, pelas expressões (1), (2) e (3) a potência que as cargas da corrente elétrica recebem é dada por:

$$p_Q = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Delta V = i(V_B - V_A)$$

No estudo de circuitos elétricos, o interesse está na potência p que o elemento do circuito recebe, que é dada por:

$$p = -p_Q = i(V_A - V_B) \quad (4)$$

1.3) ELEMENTOS UTILIZADOS EM CIRCUITOS

1.3.1) RESISTORES

Um resistor (ou resistência) é um dispositivo elétrico muito utilizado em eletrônica, com a finalidade de transformar energia elétrica em energia térmica (efeito joule) ou com a finalidade de limitar a quantidade de corrente elétrica em um circuito. Resistores são componentes que têm por finalidade oferecer uma oposição à passagem de corrente elétrica, através de seu material. A essa oposição damos o nome de resistência elétrica, que possui como unidade ohm (Ω).

A corrente elétrica que entra em um terminal do resistor será exatamente a mesma que sai pelo outro terminal, porém há uma queda de tensão. Utilizando-se esta característica, é possível usar os resistores para controlar a corrente elétrica sobre os componentes desejados.

Um resistor ôhmico é um componente com uma resistência elétrica que permanece constante independentemente da tensão ou corrente elétrica que circular pelo dispositivo.

1.3.2) LEI DE OHM

A razão entre o módulo da diferença de potencial $|\Delta V|$ entre dois terminais de um condutor e a corrente elétrica i é denominada resistência elétrica R .

$$i = \frac{|\Delta V|}{R} \quad (1)$$

Quando a resistência elétrica é constante, isto é, não depende da corrente elétrica que atravessa o resistor ele é denominado ôhmico ou linear. Neste caso a equação (1) é a Lei de Ohm.

1.4) EFEITO JOULE

Na figura 2 repetida a seguir, a corrente elétrica i vai de A para B. A potencia associada ao resistor é:

$$p_1 = i \cdot V_{AB} \quad (1)$$

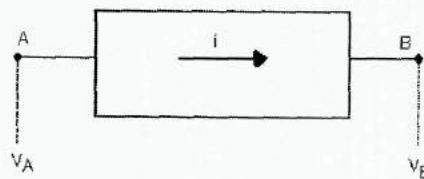


Figura 3

Como em um resistor as cargas elétricas positivas da corrente elétrica convencional vão do maior potencial para o menor potencial, a variação de potencial é positiva, isto é, $V_{AB} = R\vec{i}$.

Por isto, potência dissipada na resistência em forma de calor será:

$$p_2 = R \cdot i^2 \text{ (Efeito Joule) (2)}$$

Em um circuito, como há dissipação por efeito Joule, para garantir que a carga elétrica continue circulando, é necessário que essa energia seja reposta. O responsável por esta reposição é a força eletromotriz.

1.5) A FORÇA ELETROMOTRIZ (f.e.m):

A circulação da força eletrostática em uma trajetória fechada é nula, isto é:

$$\oint_C \vec{F}_{ele} \cdot d\vec{\ell} = 0. (1)$$

Logo a força eletrostática é conservativa. Por isto, a energia que ela fornece a uma carga elétrica que percorre o circuito fechado é nula. Isto significa que a força eletrostática fornece energia à carga elétrica em partes do circuito e retira energia fornecida em outras partes. Logo para que uma carga elétrica percorra um circuito fechado ela não pode perder energia elétrica neste circuito. Sabemos que isto não ocorre com a corrente elétrica, uma vez que há dissipação de energia pelo efeito Joule. Esta discussão fica mais clara com os análogos mecânicos representados na figura 4 e figura 5. Na figura 4 uma bola circula em um trilho vertical sem atrito. Na parte AB do lado direito do trilho a bola recebe energia da força peso. Na parte AB do lado esquerdo do trilho a força peso retira a energia fornecida. Como não existe atrito, a bola continua circulando.

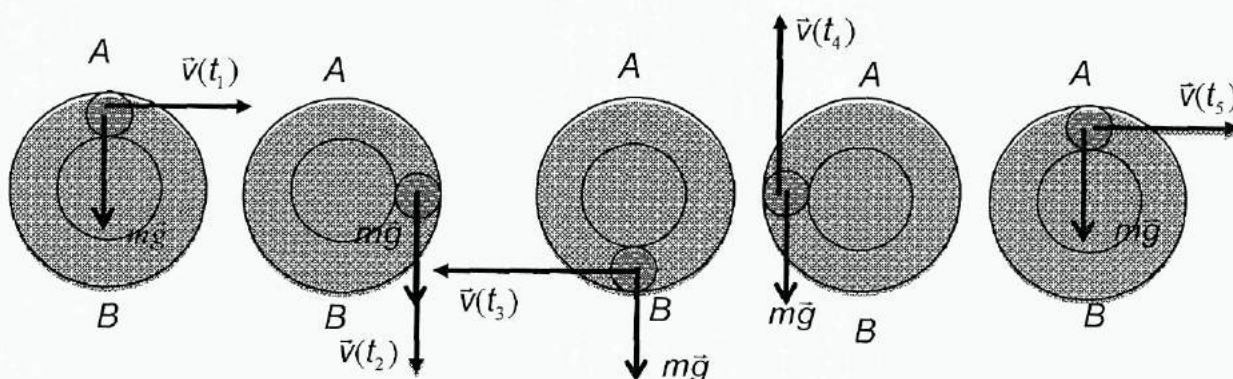


Figura 4 – O tempo está aumentando da esquerda para direita

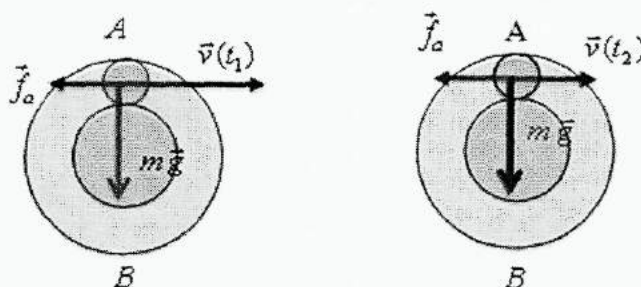


Figura 5 – O tempo está aumentando da esquerda para direita

Na figura 5 existe atrito entre a bolinha e o trilho. Logo após algum tempo a bolinha para. Logo, para ela continuar circulando, uma força externa não conservativa tem que repor a energia perdida.

Para evitar que a corrente se anule é preciso que atuem sobre a carga elétrica forças não conservativas. Uma partícula carregada, q , pode ter outras forças além das forças eletrostáticas atuando sobre ela. Estas forças podem ter origens diferentes. Por exemplo, ela pode ser produzida pelo movimento de uma esteira carregada como no caso do Gerador de Van der Graff ou pode ter origem no movimento de circuito elétrico na presença de ímãs ou ter origem química (pilhas), etc. Estas forças podem ser não conservativas, isto é:

$$W(\vec{F}) = \oint_C \vec{F} \cdot d\vec{\ell} \neq 0. (2)$$

Denominaremos a soma de todas as forças não eletrostáticas que atuam sobre a carga, de força motora (\vec{F}_{mo}) [2]. Temos então, que a força resultante que atua em uma carga elétrica q é:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_{ele} + \vec{F}_{mo} \quad (3)$$

A semelhança do campo eletrostático denominaremos a força resultante por unidade de carga campo elétrico efetivo e a força motora por unidade de carga de campo elétrico motor, isto é:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{F}_R}{q} &= \frac{\vec{F}_{ele}}{q} + \frac{\vec{F}_{mo}}{q} \\ \vec{E}_{ef} &= \frac{\vec{F}_R}{q}, \vec{E}_m = \frac{\vec{F}_{mo}}{q} \Rightarrow (4) \\ \vec{E}_{ef} &= \vec{E}_{ele} + \vec{E}_m. \end{aligned}$$

O campo eletrostático é criado pelas cargas elétricas que se depositam nas partes do circuito elétrico. As diferenças de potencial associadas a um circuito elétrico dizem respeito ao campo eletrostático.

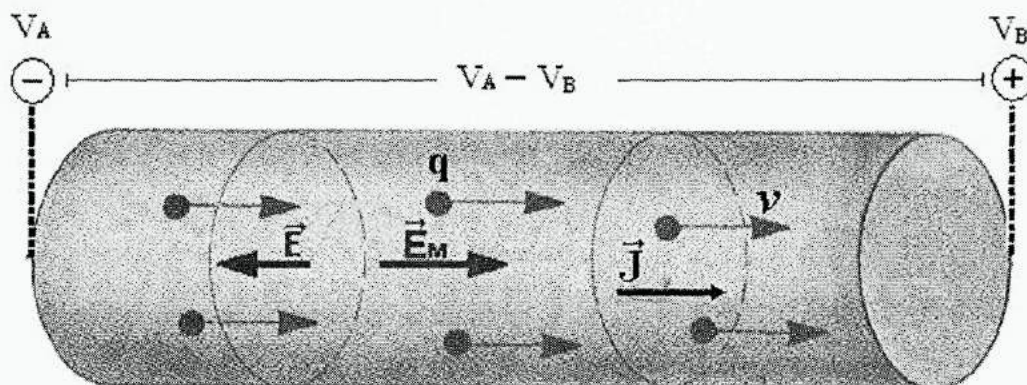


Figura 6

Por exemplo, no elemento de circuito da figura 6, a diferença de potencial entre os pontos A e B é dada por:

$$V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E}_{ele} \cdot d\vec{\ell} \quad (5)$$

Sabemos que a diferença de potencial entre os terminais de um elemento do circuito elétrico permite calcular a energia fornecida pelo campo eletrostático à carga elétrica que atravessa o elemento do circuito, isto é $\Delta U = \Delta q \cdot V_{BA}$. É possível definir uma grandeza que permite calcular a energia que o campo elétrico motor fornece às cargas elétricas que

atravessam o elemento do circuito elétrico. Esta grandeza é denominada força eletromotriz. A força eletromotriz é por definição, o trabalho realizado pela força motora por unidade de carga, isto é:

$$\varepsilon_{BA} = \frac{\int_A^B \vec{F}_m \cdot d\vec{\ell}}{q} = \frac{\int_A^B q\vec{E}_m \cdot d\vec{\ell}}{q} = \int_A^B \vec{E}_m \cdot d\vec{\ell} \quad (6)$$

A relação entre os diversos campos elétricos permite discutir a distribuição de energia elétrica no circuito elétrico. É isto que faremos seguir.

No caso de um material Ôhmico, que pode ser tratado macroscopicamente como um meio viscoso, a força resultante que atua nas cargas elétricas da corrente elétrica é proporcional à velocidade de arrasto das cargas. Neste caso, o campo elétrico efetivo é proporcional ao vetor densidade de corrente elétrica \vec{J} . Esta constante de proporcionalidade é denominada resistividade ρ .

$$\vec{E}_{ef} = \rho \cdot \vec{J} \quad (7)$$

Em casos gerais temos que $\vec{E}_{ef} = \rho(\vec{E}_{ef}) \cdot \vec{J}$, sendo $\rho(\vec{E}_{ef})$ sempre positivo.

A substituição da equação (7) na equação (4) fornece:

$$\rho \vec{J} = \vec{E}_{ele} + \vec{E}_m \quad (8)$$

A expressão (8) permite relacionar a diferença de potencial em um elemento do circuito com a força eletromotriz associada a este elemento.

Integrando o produto escalar da expressão (8) com o elemento linear $d\vec{\ell}$ temos que:

$$\int_A^B \rho \vec{J} \cdot d\vec{\ell} = \int_A^B \vec{E}_m \cdot d\vec{\ell} + \int_A^B \vec{E}_{ele} \cdot d\vec{\ell} \quad (9)$$

Da direita para a esquerda, a terceira integral é por definição o negativo da diferença de potencial V_{BA} .

$$\int_A^B \vec{E}_{ele} \cdot d\vec{\ell} = -(V_B - V_A) = -V_{BA} \quad (10)$$

A segunda integral é a força eletromotriz ε_{BA} do segmento AB.

$$\varepsilon_{BA} = \int_A^B \vec{E}_m \cdot d\vec{\ell} \quad (11)$$

No caso de matérias ôhmicas, a resistividade não depende do campo elétrico resultante. Neste caso, o cálculo da primeira integral realizado a seguir, mostra que ela pode ser escrita como $i \cdot r$, onde r é a resistência entre A e B do elemento de circuito.

$$\begin{aligned}
\int_A^B \rho \vec{J} \cdot d\vec{\ell} &= \int_A^B \rho J \cdot d\ell \\
\int_A^B \rho \vec{J} \cdot d\vec{\ell} &= \rho J \cdot \int_A^B d\ell \\
\int_A^B \rho \vec{J} \cdot d\vec{\ell} &= \rho \cdot \frac{i}{A} \cdot \ell \\
\rho \cdot \frac{i}{A} \cdot \ell & \\
\begin{cases} \int_A^B \rho \vec{J} \cdot d\vec{\ell} = \frac{\rho \cdot i}{A} \cdot \ell \\ r = \frac{\rho}{A} \cdot \ell \end{cases} &\Rightarrow \int_A^B \rho \vec{J} \cdot d\vec{\ell} = r \cdot i
\end{aligned}
\tag{12}$$

Temos então:

$$V_B - V_A = \varepsilon_{BA} - ri \tag{13}$$

Se removermos da equação (13) a força eletromotriz, ela se transforma na Lei de Ohm .

$$V_B - V_A = -ri \tag{14}$$

Se não houver o termo ri , a equação (13) mostra que quando o circuito está aberto, isto é, quando a corrente elétrica é nula, a diferença de potencial entre A e B é igual à força eletromotriz.

Resumindo, a força eletromotriz de um dispositivo é o trabalho por unidade de carga que o campo motor realiza ao mover a carga do seu terminal de baixo potencial para o terminal de alto potencial. A diferença de potencial nos terminais do dispositivo só é igual à força eletromotriz quando ele está aberto.

$$\varepsilon_{BA} = V_{BA} \tag{15}$$

1.6) GERADOR E RECEPTOR DE CORRENTE ELÉTRICA

Se a corrente vai de A para B, e o potencial do ponto B for mais elevado do que o potencial de A então V_{BA} é positivo, conseqüentemente existe uma transferência de energia líquida do componente do circuito para a corrente elétrica. Por exemplo, se o componente for uma bateria, a energia química da bateria será transferida para a corrente elétrica, que irá transportá-la para outras partes do circuito elétrico. Assim o elemento está atuando como uma

fonte de energia, ou seja, um gerador. Logo o gerador é um elemento do circuito que transforma outros tipos de energia em energia elétrica.

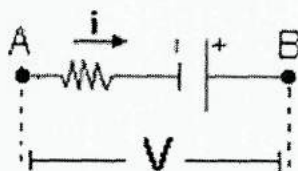


Figura 7

Se a corrente vai de A para B, e o potencial do ponto B for menor do que o potencial de A então V_{BA} é negativo, consequentemente existe uma transferência de energia líquida da corrente elétrica para o componente do circuito elétrico. Neste caso, o componente do circuito é denominado receptor. Por exemplo, se o componente for um resistor, as cargas da corrente elétrica ao colidirem com os átomos do resistor, transferem energia para os átomos, aumentando a energia interna do material. Consequentemente, a energia elétrica da corrente elétrica foi transformada em energia interna. No motor elétrico, que recebe energia elétrica da corrente elétrica, esta é transformada em energia mecânica. Logo o receptor é um elemento do circuito que transforma energia elétrica em outro tipo de energia.

1.7) POTÊNCIA FORNECIDA POR UMA FONTE

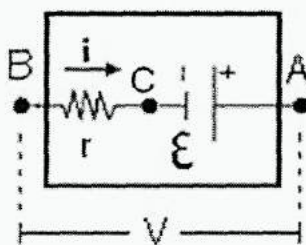


Figura 8

A figura 8 representa um trecho de um circuito onde existe uma fonte com força eletromotriz ϵ e resistência interna r ligada por condutores ideais ao circuito externo. A corrente elétrica tem o sentido de B para A. O potencial no ponto A é maior do que em B ($V_A > V_B$), logo V_{AB} é positivo. Como o potencial elétrico cai de ri quando a corrente elétrica vai de B para C a diferença de potencial nos terminais da fonte com resistência interna r é:

$$V_{AB} = \epsilon - r.i \quad (1)$$

Sabemos que a potência que a fonte fornece ao circuito é $p = i.V_{AB}$, temos então:

$$p = (\epsilon - r.i).i = \epsilon.i - r.i^2 \quad (2)$$

Na equação acima o termo $\epsilon.i$ representa a taxa de conversão de energia não elétrica em elétrica no interior da fonte. O termo $r.i^2$ é a taxa com a qual a energia elétrica está sendo

dissipada na resistência interna da fonte. A diferença $\varepsilon \cdot i - r \cdot i^2$ é a potência elétrica útil da fonte, ou seja, a taxa com a qual a energia elétrica é fornecida pela fonte para o circuito externo.

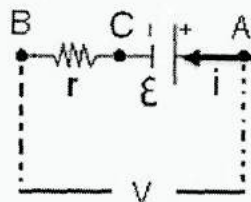


Figura 9

É importante ressaltar que um gerador de energia pode funcionar também como receptor de energia. Por exemplo, a figura 9 representa um trecho de um circuito onde existe uma fonte com força eletromotriz ε e resistência interna r ligada por condutores ideais ao circuito externo. A corrente elétrica tem o sentido de A para B. O potencial no ponto A é maior do que em B ($V_A > V_B$), logo V_{BA} é negativo. Como o potencial elétrico diminui de $r \cdot i$ quando a corrente elétrica vai de C para B, a diferença de potencial V_{BA} é

$$V_{BA} = -(\varepsilon + r \cdot i) \quad (3)$$

Sabemos que a potência que a fonte recebe é, $p = i \cdot V_{AB}$, temos então:

$$p = V_{AB} \cdot i = (\varepsilon + r \cdot i) \cdot i = \varepsilon \cdot i + r \cdot i^2 \quad (4)$$

Na equação acima o termo $\varepsilon \cdot i$ representa a taxa de conversão de energia elétrica em energia não elétrica no interior da fonte. O termo $r \cdot i^2$ é novamente a taxa com a qual a energia elétrica está sendo dissipada na resistência interna da fonte. A soma $\varepsilon \cdot i + r \cdot i^2$ é a potência absorvida pela fonte. Temos então uma conversão de energia elétrica em outros tipos de energia.

Faremos aqui, uma breve observação acerca do conceito de energia. A energia é uma grandeza física que tradicionalmente se define como a capacidade de corpos e sistemas para realizar um trabalho. A energia pode adotar diversas formas, podendo transformar-se, embora não se crie e nem se destrua (princípio da conservação da energia).

CAPÍTULO 2 – CORRENTE ALTERNADA

2.1) DEFINIÇÃO DE CORRENTE ALTERNADA

A corrente alternada (CA) é uma corrente elétrica cujo sentido varia no tempo, porque a voltagem troca de polaridade constantemente. Esta troca de polaridade provoca, nos circuitos elétricos, um fluxo de cargas ora em um sentido, ora em outro. A forma de onda usual em um

circuito de potência CA é senoidal. Entretanto, em certas aplicações, diferentes formas de ondas são utilizadas, tais como triangular ou ondas quadradas. Na nossa residência utilizamos a corrente alternada senoidal. As ondas quadradas são universalmente encontradas nos circuitos de chaveamento digitais e são naturalmente encontradas em dispositivos lógicos de dois níveis.

A condição fundamental para que uma determinada tensão elétrica seja considerada como tensão alternada é que a sua polaridade não seja constante. Os diversos tipos de tensão em CA podem ser distinguidos através de quatro características [1]:

- 1) Forma de onda - Existem tensões alternadas com diversos tipos de onda (quadradas, senoidais ou triangulares). Na figura 1 temos o exemplo de uma onda senoidal.
- 2) Ciclo - É uma variação completa da forma de onda. O ciclo é uma parte da forma de onda que se repete sucessivamente.
- 3) Período - é a designação utilizada para definir o tempo necessário para que se realize um ciclo completo de uma corrente alternada (T em segundos). O período representado por T na figura 1.
- 4) Frequência - A frequência f é número de ciclos de uma corrente alternada que ocorrem em 1 segundo. (f em hertz (Hz)).

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Gráfico: V (Volts) \times t (segundos)

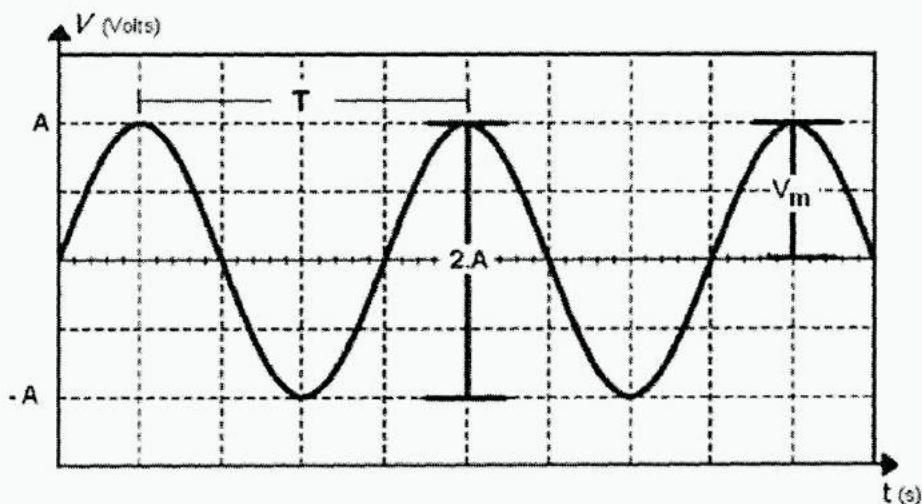


Figura 1

2.1.1) EQUAÇÕES MATEMÁTICAS:

As correntes e as tensões alternadas harmônicas são descritas matematicamente pela função:

$$a(t) = A.\text{sen}(\omega.t + \phi) \quad (2)$$

Logo a tensão e a corrente podem ser descritas como:

$$v(t) = v_m.\text{sen}(\omega.t + \phi_v) \quad (3)$$

$$i(t) = i_m.\text{sen}(\omega.t + \phi_i) \quad (4)$$

Onde:

$$\omega = 2.\pi.f \quad (5)$$

Sendo que ω é a frequência angular.

Na equação (2), v_m é a amplitude máxima da voltagem e ϕ_v é a constante de fase da voltagem.

Na equação (3), i_m é a amplitude máxima de corrente e ϕ_i é a constante de fase da corrente.

É importante observar que para a área de engenharia existe uma diferença conceitual na hora de representar grandezas que variam com o tempo e grandezas constantes. As grandezas que variam com o tempo, para engenharia, são representadas com letra minúscula e as grandezas constantes são representadas com letras maiúsculas. Como esta monografia pertence à física, esta diferença conceitual não foi rigorosamente obedecida, uma vez que em física não há esta diferenciação.

2.2) REPRESENTAÇÃO FASORIAL DE UMA FUNÇÃO HARMÔNICA [2]

Um fasor (figura 2 b) é um vetor que gira em um plano com velocidade angular constante ω . Se o fasor tem módulo A e forma um ângulo θ com a horizontal, a sua projeção A_x no eixo horizontal é:

$$A_x = A.\cos(\theta) \quad (6)$$

Como o fasor gira com velocidade angular ω constante e tem fase inicial ϕ , o ângulo θ é uma função do tempo igual a:

$$\theta = \omega t + \phi. \quad (7)$$

Logo a componente y do fasor se reduz a:

$$A_y = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi) \quad (8)$$

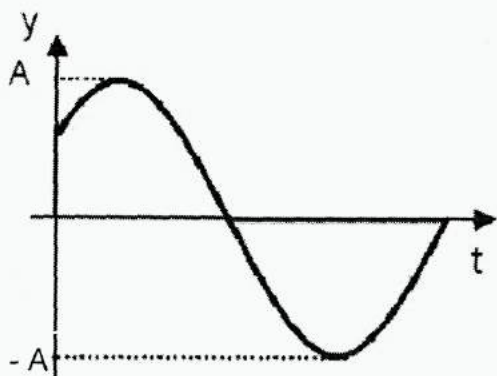


Figura 2-a: Gráfico da equação 15

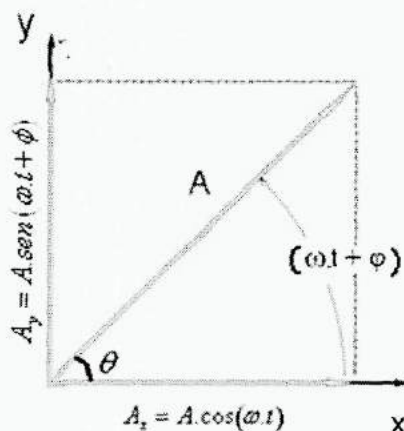


Figura 2-b: Representação fasorial

Por isso, qualquer função harmônica que varia harmonicamente com o tempo pode ser representada pela componente y de um fasor. Para representar uma função harmônica por um fasor é suficiente identificar a amplitude máxima da função harmônica como o módulo do fasor, a frequência angular como a velocidade angular do fasor e a constante de fase como a fase inicial do fasor. Logo, a componente y de um fasor é uma representação geométrica de uma função harmônica.

A figura 2-a apresenta o gráfico de uma função harmônica e a figura 2-b a representação fasorial da mesma função.

2.2.1) REPRESENTAÇÃO FASORIAL DAS VOLTAGENS EM UMA ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE. [2]

Para fornecer uma corrente alternada a um circuito é necessária uma fonte de voltagem. Um exemplo desse tipo de fonte é uma espira girando com velocidade angular constante em um campo magnético. Essa rotação produz uma força eletromotriz senoidal. Lembrando que:

$$V = V_m \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi_V) \quad (9)$$

Como a voltagem é representada por uma função harmônica a corrente também é representada por uma função harmônica. É sempre possível escolher a constante de fase inicial da corrente como nula, desta forma, podemos escrever a corrente elétrica senoidal que atravessa um circuito como:

$$i = i_m \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (10)$$

Nas expressões (9) e (10), V e i são respectivamente, a diferença de potencial instantânea fornecida pela fonte e a corrente instantânea que atravessa o circuito; v_m e i_m são respectivamente a amplitude máxima da voltagem e a amplitude máxima de corrente. É importante ressaltar que de uma maneira geral a voltagem fornecida pela fonte e a corrente elétrica não estão em fase. (Ver vídeo "resistência senoidal" no DVD que acompanha esta monografia)

Podemos representar correntes e tensões que variam harmonicamente utilizando fasores:

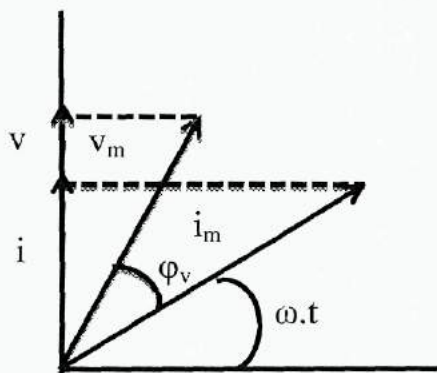


Figura 3

2.3) VOLTAGEM PICO-A-PICO:

A voltagem pico-a-pico denominada comumente por V_{p-p} é definida como a diferença entre valor do seu pico positivo e o valor do seu pico negativo. Como a tensão CA oscila entre V_m e $-V_m$, a voltagem pico a pico é dada por:

$$V_m - (-V_m) = 2V_m. \quad (11)$$

O valor da voltagem pico-a-pico está representado na figura 1 (2.A). Ela tem o dobro do valor da amplitude de voltagem.

2.4) VOLTAGEM NOS TERMINAIS DE UM RESISTOR E A SUA DIFERENÇA DE FASE COM A CORRENTE ELÉTRICA [2]

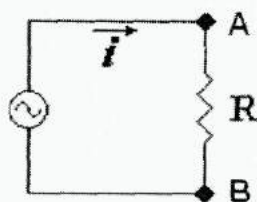


Figura 4

O circuito apresentado na figura 4 é composto por uma fonte de tensão CA e um resistor R. A tensão fornecida pela fonte e a corrente que percorre o circuito, apresentam uma dependência temporal, sendo respectivamente descritas nas equações (9) e (10), logo a diferença de potencial sobre o resistor é escrita como:

$$v_R = R i_m \text{sen}(\omega t) = v_m \text{sen}(\omega t) \quad (12)$$

Sendo:

$$v_m = R i_m \quad (13)$$

v_R é a tensão instantânea, e v_m amplitude máxima de tensão. A relação entre a amplitude máxima de tensão, a amplitude máxima de corrente e a resistência é análoga à relação entre tensão e corrente no circuito de corrente contínua. No vídeo denominado "circuito R em onda senoidal", que acompanha esta monografia podemos observar que a resistência depende da frequência. Isto ocorre, pois à medida que a frequência aumenta a corrente elétrica se desloca para a periferia do condutor, atravessando uma seção reta menor, o que aumenta sua resistência (efeito pelicular). Todavia em determinadas faixas de frequência, esta variação é desprezível e a resistência pode ser considerada constante. Nesta monografia, trabalharemos dentro de uma faixa de frequência, onde a variação da resistência com a frequência pode ser desprezada.

A expressão (12) também mostra que a tensão nos terminais do resistor e a corrente elétrica estão em fase.

Os fasores associados à corrente e à tensão nos terminais de um resistor estão representados na figura (5).

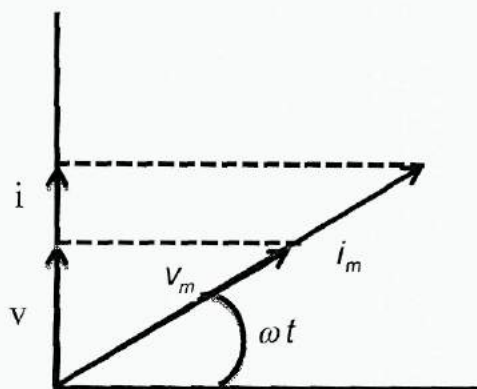


Figura 5

Na figura 5, v_m e i_m são as amplitudes máximas de tensão e de corrente. Como a tensão nos terminais do resistor e a corrente elétrica no resistor estão em fase, os fasores da figura 5 são paralelos.

2.5) TENSÃO NOS TERMINAIS DE UM CAPACITOR E A SUA DIFERENÇA DE FASE COM A CORRENTE ELÉTRICA [2]

2.5.1) O QUE É UM CAPACITOR [2]

Capacitor é um componente que armazena carga elétrica. É constituído por um par de condutores separados por um (isolante) dielétrico. Quando ele é ligado a uma fonte, a fonte transfere elétrons de um dos condutores para o outro condutor. Logo se estabelece entre as placas do capacitor um campo eletrostático. Como existe campo elétrico no interior do capacitor, ele armazena energia elétrica.

Em um capacitor, a relação entre a carga elétrica positiva que se acumula em uma das suas placas e a tensão nos seus terminais é constante, esta constante é denominada capacitância.

$$C = \frac{q}{V} \quad (14-a)$$

A expressão (14) mostra que quando dois capacitores são ligados a uma mesma tensão aquele que tem capacitância maior acumula uma quantidade maior de carga. Logo a capacitância está relacionada com a capacidade do capacitor em acumular cargas elétricas. A unidade de capacitância é denominada faraday (F).

A energia elétrica acumulada no capacitor é

$$U_E = \frac{q^2}{2C} \quad (14-b)$$

2.5.2) CAPACITOR EM CIRCUITO CA [2]

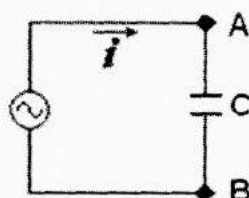


Figura 6

A figura 6 mostra um capacitor sendo alimentado por corrente alternada. A corrente é dada por $i = i_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$. A relação entre carga elétrica e corrente elétrica é:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (15)$$

Logo temos que:

$$q = \int \frac{dq}{dt} dt = \int i_m \text{sen}(\omega t) dt = -\frac{i_m}{\omega} \cos(\omega t) = -\frac{i_m}{\omega} \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right)$$

$$q = \frac{i_m}{\omega} \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (16)$$

A equação (14-a) permite calcular a voltagem nos terminais do capacitor :

$$v_C = v_{Cm} \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (17)$$

Onde:

$$v_{Cm} = X_C \cdot i_m \text{ e } X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}. \quad (18)$$

A equação (18) mostra que tensão máxima v_{Cm} no capacitor é inversamente proporcional à frequência da fonte,

A comparação entre a expressão da voltagem máxima nos terminais de um resistor $v_{Rm} = R \cdot i_m$ e a voltagem máxima dos terminais do capacitor mostra que a unidade da grandeza X_C é ohm. Esta grandeza é denominada reatância capacitiva do capacitor. A reatância capacitiva é a resistência que o capacitor oferece a passagem de corrente alternada. A reatância capacitiva é inversamente proporcional a ω e C , logo quanto maior a capacitância e maior a frequência menor será a reatância capacitiva X_C .

Os capacitores tendem a permitir à passagem de uma corrente com frequência elevada e bloquear correntes com baixa frequência. Como a corrente contínua tem frequência nula, no regime estacionário não existe corrente elétrica.

Segundo a equação (17) podemos observar que a tensão entre os terminais do capacitor está atrasada em 90° em relação à corrente elétrica.

Os alunos de ensino médio das escolas técnicas não conhecem cálculo diferencial e integral. Por isto, a expressão da voltagem nos terminais do capacitor não pode ser obtida integrando-se a corrente elétrica. Com a finalidade de mostrar estes resultados fizemos o vídeo "Circuito RC onda senoidal" (disponível no DVD) que mostra alguns dos resultados obtidos com o cálculo diferencial e integral com o osciloscópio. No vídeo também são apresentadas cenas onde fica nítido que o capacitor oferece uma resistência à passagem de corrente alternada e que esta resistência diminui com o aumento da capacitância e com o aumento da frequência da fonte.

A corrente e a tensão sobre o capacitor podem ser representadas em um diagrama de fasores, como mostrado na Figura 7.

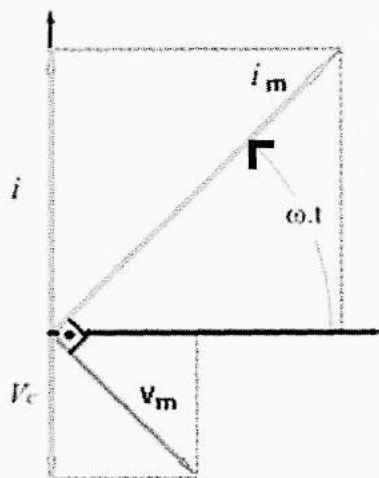


Figura 7

Sendo:

$$V_C = V_{Cm} \cdot \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ e } i = i_m \cdot \text{sen}(\omega.t) \quad (19)$$

2.6) VOLTAGEM NOS TERMINAIS DE UMA BOBINA (INDUTOR) E A SUA DIFERENÇA DE FASE EM RELAÇÃO CORRENTE ELÉTRICA [2]

Um indutor é um elemento do circuito que oferece resistência à variação da corrente elétrica que o atravessa. Como exemplo de indutor podemos citar uma bobina preenchida com um núcleo de ferro.

A lei de Faraday explica por que um indutor oferece resistência à variação de corrente elétrica. A Lei de Faraday diz: a variação com o tempo do fluxo magnético que atravessa uma superfície aberta A, cria no contorno da superfície, uma força eletromotriz induzida, isto é,

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_M}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}. \quad (20)$$

Quando um indutor é percorrido por uma corrente elétrica variável, aparece no indutor uma força eletromotriz auto-induzida com a finalidade de evitar a variação do fluxo magnético criado pela corrente elétrica.

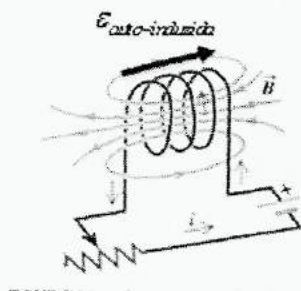


Figura 8

Nos indutores preenchidos com meios lineares ou quase lineares o fluxo magnético é proporcional à corrente elétrica que atravessa o indutor. Esta constante de proporcionalidade é denominada indutância própria L. Neste caso temos que

$$\phi_M = Li \Rightarrow \varepsilon_{\text{auto-induzida}} = -\frac{d}{dt}(Li) = -L \frac{di}{dt}. \quad (21)$$

A f.e.m induzida aumenta com o aumento da autoindutância, a constante que mede a inércia que um indutor oferece à variação de corrente elétrica, que o atravessa, é chamado de indutância própria L. A unidade de indutância é o henry (H).

Como existe campo magnético no interior de um indutor, ele armazena energia magnética. A energia magnética acumulada em um indutor é

$$U_M = \frac{Li^2}{2}. \quad (22)$$

2.6.1) INDUTOR EM CIRCUITO DE CORRENTE ALTERNADA [2]

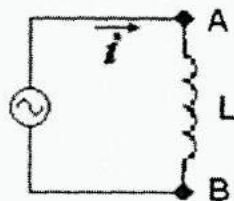


Figura 9

A figura (9) representa um indutor ideal com indutância L , ligado a uma fonte de corrente alternada percorrido por uma corrente alternada $i = i_m \text{sen}(\omega t)$. O indutor ideal tem resistência elétrica desprezível. A diferença de potencial instantânea entre os terminais do indutor de indutância L é dada por:

$$\begin{aligned} v_L &= L \frac{di}{dt} = L \frac{d(i_m \text{sen}(\omega t))}{dt} = i_m \omega L \cos(\omega t) = i_m \omega L \cos(-\omega t) \\ v_L &= i_m \omega L \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - (-\omega t)\right) = i_m \omega L \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ v_L &= v_m \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (23)$$

Onde:

$$v_m = X_L i_m \text{ e } X_L = L\omega \quad (24)$$

Novamente fazendo uma analogia com a equação (12), obtemos:

$$X_L = L\omega \quad (25)$$

Esta grandeza apresenta unidades de ohm e é denominada reatância indutiva do indutor. A reatância indutiva é na realidade consequência da força eletromotriz auto-induzida que se opõe a qualquer variação de corrente através do indutor. A reatância indutiva é a resistência que o indutor oferece à passagem de corrente alternada. A reatância indutiva é diretamente proporcional a ω e L , logo quanto maior a indutância e maior a frequência maior será a reatância indutiva X_L .

Podemos notar que a tensão entre os terminais do indutor está adiantada em 90° com relação à fase da corrente que circula no circuito.

Os alunos de ensino médio das escolas técnicas não conhecem cálculo diferencial e integral. A expressão da voltagem nos terminais do indutor não pode ser obtida derivando-se a corrente elétrica. Com a finalidade de mostrar estes resultados fizemos o vídeo "Circuito RL onda senoidal" (disponível no DVD) que mostra os resultados obtidos com o cálculo diferencial e integral com o osciloscópio. Também são apresentadas cenas onde fica nítido que o indutor oferece uma resistência à passagem de corrente alternada e que esta resistência aumenta com o aumento da indutância e com o aumento da frequência da fonte.

A corrente elétrica que circula no circuito e a tensão instantânea presente entre os terminais do indutor podem ser representadas em um diagrama de fasores, mostrado na figura 10.

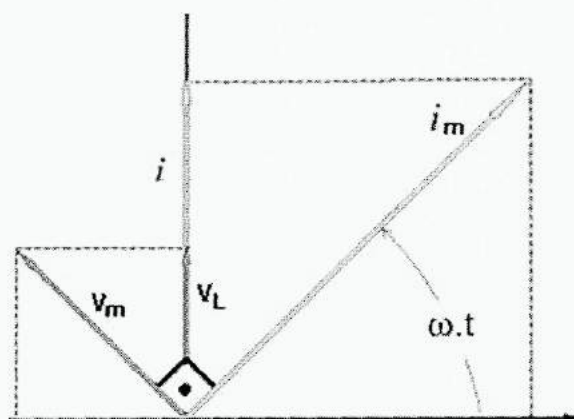


Figura 10

Sendo, $v_L = v_m \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2})$ e $i = i_m \text{sen}(\omega t)$.

2.7) POTÊNCIA EM CORRENTE ALTERNADA [2]

2.7.1) VOLTAGEM EFICAZ E POTÊNCIA MÉDIA OU ATIVA EM UM RESISTOR

O circuito com resistor e fonte senoidal que foi representado na figura 4, repetida a seguir, é percorrido pela corrente elétrica $i = i_m \text{sen}(\omega t)$. A voltagem no resistor é

$$v = v_m \text{sen}(\omega t).$$

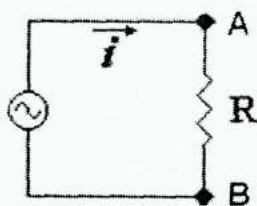


Figura 11

Nele a potência instantânea associada ao resistor é dada por $p = vi = \frac{v^2}{R}$. Logo a potência instantânea é dada por:

$$p = v_m i_m \sin(\omega t) \sin(\omega t) = v_m i_m \sin^2(\omega t). \quad (26)$$

O gráfico $v.i$ representado na figura-12 é obtido multiplicando-se as alturas dos gráficos v e i .

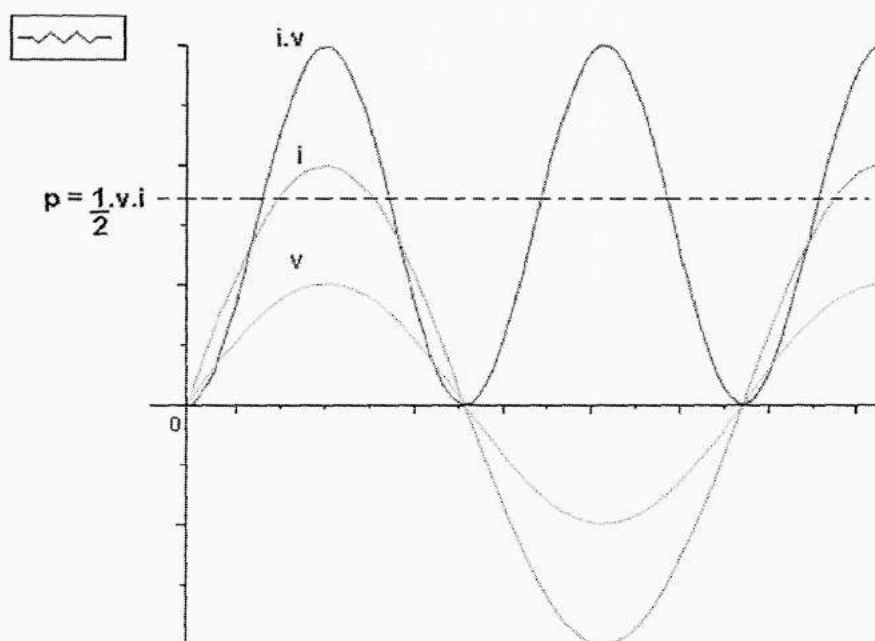


Figura 12

O produto $v.i$ é sempre positivo, porque as funções v e i ou são ambas positivas ou ambas negativas. Portanto, a energia é fornecida para o resistor em cada instante nos dois sentidos de i , embora a potência não seja constante.

Como a rede elétrica funciona com uma frequência de 60 Hz e a potência instantânea varia rapidamente no tempo o que é utilizado é a potência média, que é dada por:

$$\langle p \rangle = \frac{\int_t^{t+T} p(t) dt}{T} = \frac{\int_t^{t+T} \frac{v^2}{R} dt}{T} = \frac{1}{R} \frac{\int_t^{t+T} v^2 dt}{T} = \frac{\langle v^2 \rangle}{R}. \quad (27)$$

Para uma função periódica, o valor médio é igual à soma das áreas formadas entre a curva da função e o eixo horizontal do plano cartesiano, durante um ciclo completo, dividido pelo período da função. Sendo que: áreas acima do eixo são positivas e áreas abaixo do eixo são negativas.

Na expressão da potência média aparece naturalmente o valor médio do quadrado da

$$\text{voltage que é dada por } \langle v^2 \rangle = \frac{\int_t^{t+T} v^2 dt}{T}.$$

O valor médio do quadrado da tensão:

$$\begin{aligned} v^2 &= v_m^2 \sin^2(\omega t) = v_m^2 (1 - \cos^2(\omega t)) \\ v^2 &= v_m^2 \left(1 - \frac{1 + \cos(2\omega t)}{2} \right) = \frac{v_m^2}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{2} \cdot v_m^2 \\ \langle v^2 \rangle &= \frac{\int_t^{t+T} v^2 dt}{T} = \frac{\int_t^{t+T} \left(\frac{v_m^2}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{2} \cdot v_m^2 \right) dt}{T} = \frac{v_m^2}{2} - \frac{v_m^2}{2} \cdot \frac{\int_t^{t+T} \left(\frac{\cos(2\omega t)}{2} \right) dt}{T} \end{aligned} \quad (28)$$

Os cálculos apresentados seguir mostram que valor médio da função $\cos(2\omega t)$ em um período T é nulo.

$$\begin{aligned} \langle \cos(2\omega t) dt \rangle &= \frac{\int_t^{t+T} \cos(2\omega t) dt}{T} \\ \langle \cos(2\omega t) dt \rangle &= \frac{1}{2\omega T} [\sin(2\omega t)]_t^{t+T} \\ \langle \cos(2\omega t) dt \rangle &= \frac{1}{2\omega T} (\sin(2\omega t + 2\omega T) - \sin(2\omega t)) = 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Logo o valor médio do quadrado da tensão é:

$$\langle v^2 \rangle = \frac{v_m^2}{2} \quad (30)$$

Logo de acordo com as equações (27) e (30), a potência média dissipada no resistor é dada por:

$$\langle p \rangle = P = \frac{v_m^2}{2R}. \quad (31)$$

Denominamos a raiz quadrada do valor médio do quadrado da tensão de tensão eficaz:

$$V_{eficaz} = \frac{v_m}{\sqrt{2}}. \quad (30)$$

A potência média pode ser reescrita em termos da voltagem eficaz da seguinte forma:

$$\langle p \rangle = \frac{V_{\text{eficaz}}^2}{R} \quad (32)$$

Logo a voltagem eficaz é o valor de voltagem que produz na resistência submetida a uma tensão contínua igual a V_{ef} uma potencia igual a potencia média dissipada pela corrente alternada.

A potência instantânea máxima é $p_m = v_m v_m = \frac{v_m^2}{R}$. A figura 12 repetida a seguir, mostra que a curva de potência instantânea do resistor é simétrica em torno de um valor $\frac{p_m}{2}$.

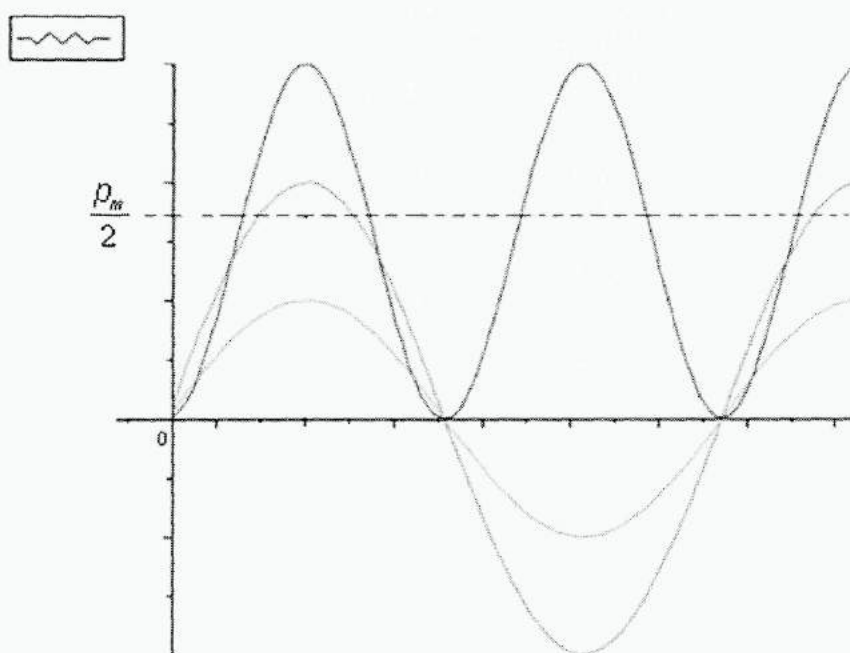


Figura 13

Este valor coincide com o valor da potencia média, uma vez que:

$$\frac{p_m}{2} = \frac{v_m^2}{2R} = \frac{V_{\text{eficaz}}^2}{R} \quad (33)$$

2.7.2) CORRENTE EFICAZ

De modo similar ao da voltagem eficaz podemos definir a corrente eficaz, partindo da equação (10):

$$I_{eficaz} = \sqrt{\langle i^2 \rangle} = \sqrt{\langle i_m^2 \sin^2(\omega t) \rangle} = \frac{i_m}{\sqrt{2}}. \quad (34)$$

A corrente eficaz é o valor da corrente que produz na resistência uma potência média igual àquela que seria dissipada neste resistor caso ele fosse percorrido por uma corrente continua com valor igual ao da corrente eficaz.

A maioria dos multímetros digitais medem a voltagem eficaz e corrente eficaz.

2.7.3) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA E MÉDIA EM UM INDUTOR

O circuito com indutor ideal e fonte senoidal que foi representado na figura 10, repetida a seguir, é percorrido pela corrente elétrica $i = i_m \sin(\omega t)$. A voltagem no indutor é

$$v = v_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

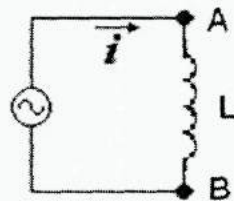


Figura 14

No circuito da figura 14 a potência instantânea associada ao indutor é dada por:

$$\begin{aligned} p &= v_L i = v_m i_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \sin(\omega t) \\ p &= v_m i_m \cos(\omega t) \sin(\omega t) \\ p &= \frac{v_m^2}{2\chi_L} \sin(2\omega t). \end{aligned} \quad (35)$$

Logo a potencia média dissipada no indutor é dada por:

$$\langle p \rangle = P = \frac{\int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt}{T} = \frac{v_m^2}{2\chi_L} \langle \sin(2\omega t) \rangle = 0 \quad (36)$$

O fato da potência média no indutor ideal ser nula indica que em uma parte do ciclo ele recebe energia da fonte e na outra parte do ciclo ele devolve a mesma quantidade de energia para a fonte. Este resultado pode ser visualizado com facilidade no gráfico da figura 15.

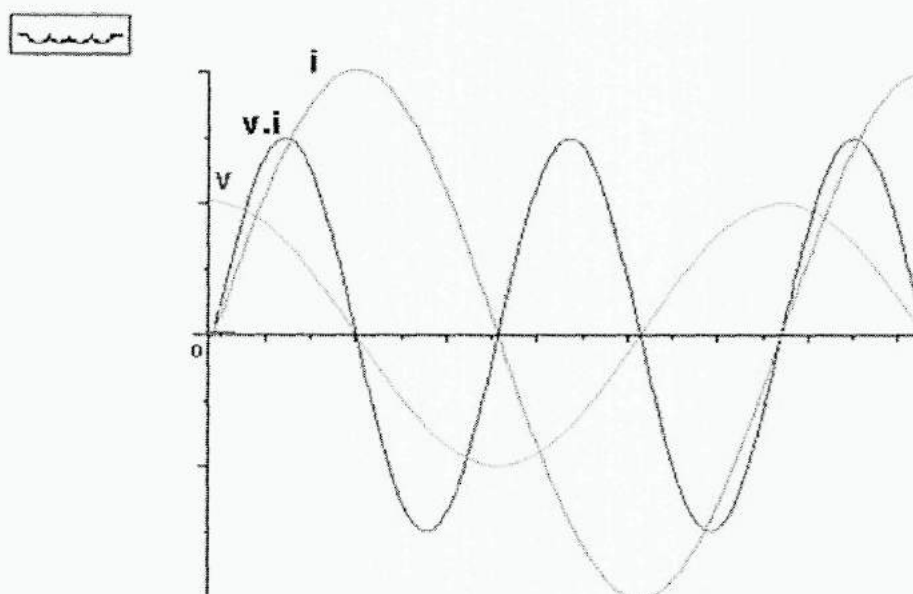


Figura 15

A figura 15 mostra as curvas de tensão, corrente e potência para um indutor. A curva da curva de potência instantânea $v.i$, é simétrica em relação ao eixo horizontal, sendo positiva na metade do tempo e negativa na outra metade.

Analisando a área da curva da função $v.i$, notamos que o semiciclo positivo é igual ao semiciclo negativo, ou seja, o fluxo líquido de energia no indutor ideal é zero a cada ciclo.

Dizemos que a potência no indutor ideal é reativa porque o seu valor médio é nulo. A energia que ele recebe da fonte não pode ser utilizada para realizar trabalho útil.

2.7.4) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA E MÉDIA EM UM CAPACITOR

O circuito com capacitor e fonte senoidal que foi representado na figura 6, repetida a seguir, é percorrido pela corrente elétrica $i = i_m \text{sen}(\omega t)$. A tensão no capacitor é

$$v_C = v_{Cm} \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

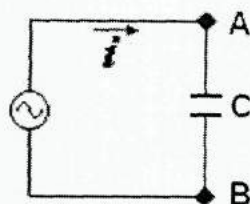


Figura 16

No circuito da figura 16 a potência instantânea associada ao capacitor é dada por:

$$\begin{aligned} p &= v_C i = v_m i_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \sin(\omega t) \\ p &= -v_m i_m \cos(\omega t) \sin(\omega t) \quad (37) \\ p &= -\frac{v_m^2}{2\chi_C} \sin(2\omega t). \end{aligned}$$

O valor médio da potência instantânea no indutor é nulo, pois

$$\langle p \rangle = P = \frac{\int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt}{T} = -\frac{v_m^2}{2\chi_C} \langle \sin(2\omega t) \rangle = 0. \quad (38)$$

O fato da potência média no capacitor ser nula indica que em uma parte do ciclo ele recebe energia da fonte e na outra parte do ciclo ele devolve a mesma quantidade de energia para a fonte. Este resultado pode ser visualizado com facilidade no gráfico da figura 17.

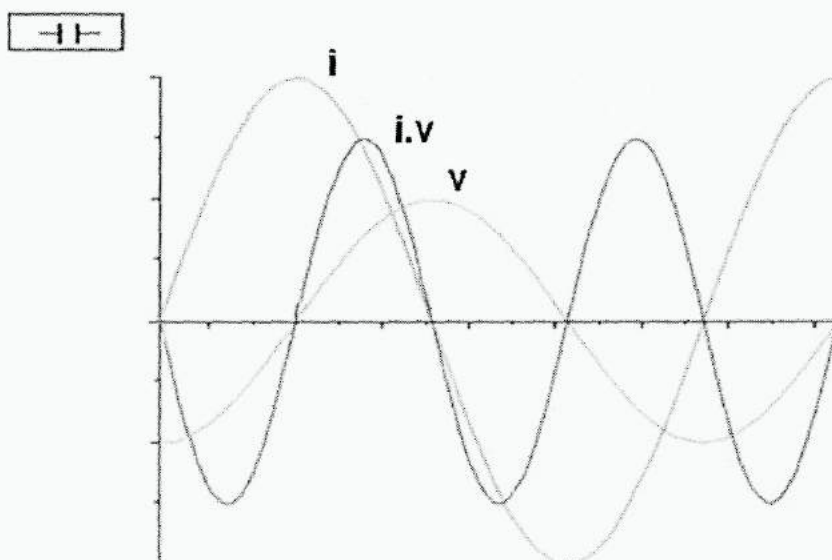


Figura 17

A figura 17 mostra as curvas de voltagem, corrente e potência para um capacitor. A curva de potência instantânea $v.i$, é simétrica em relação ao eixo horizontal, sendo positiva na metade do tempo e negativa na outra metade.

Analisando a área da curva da função $v.i$, notamos que o semiciclo positivo é igual ao semiciclo negativo, ou seja, o fluxo líquido de energia no capacitor é nulo a cada ciclo.

Dizemos que a potência no capacitor é reativa porque o seu valor médio é nulo. A energia que ele recebe da fonte não pode ser utilizada para realizar trabalho útil.

2.8) O CIRCUITO RLC [2]

A figura (18) mostra um circuito composto por uma resistência ideal de valor R , um capacitor ideal com capacitância C e um indutor ideal com indutância L , alimentados por uma fonte de corrente alternada. A corrente que percorre o circuito é dada por $i = i_m \text{sen}(\omega t)$ e a voltagem é dada por $V = v_m \text{sen}(\omega t + \phi_V)$.

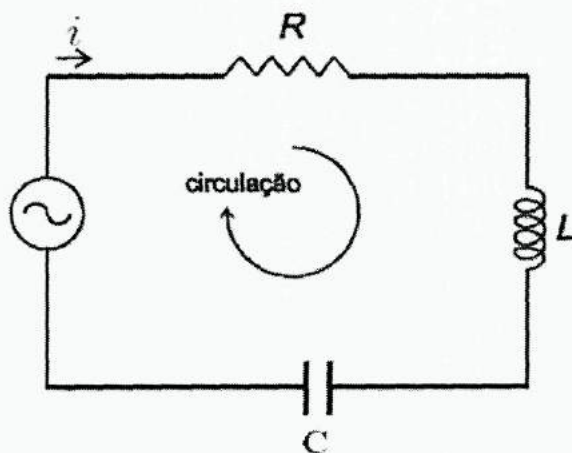


Figura 18

Aa voltagens nos terminais do resistor, do capacitor e do indutor são:

$$\begin{aligned} v_R &= v_{Rm} \text{sen}(\omega t) = R i_m \text{sen}(\omega t) \\ v_C &= v_{Cm} \text{sen}(\omega t) = \chi_C i_m \text{sen}(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ v_L &= v_{Lm} \text{sen}(\omega t) = \chi_L i_m \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2}). \end{aligned} \quad (39)$$

Na figura 19 foram representados os fasores das voltagens v_C , v_R e v_L .

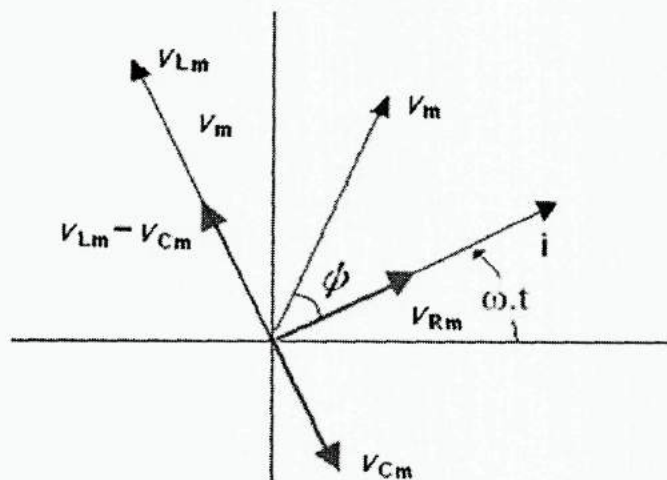


Figura 19

Na figura 19, o fasor da fonte (fasor azul) foi obtido fazendo-se a soma vetorial dos fasores das tensões v_{Cm} , v_{Rm} e v_{Lm} . A figura mostra que a amplitude máxima v_m do fasor da fonte é dada por:

$$\begin{aligned}
 v_m &= \sqrt{(v_{Lm} - v_{Cm})^2 + v_{Rm}^2} \\
 v_m &= \sqrt{(\chi_L i_m - \chi_C i_m)^2 + R^2 i_m^2} \quad (40) \\
 v_m &= i_m \sqrt{(\chi_L - \chi_C)^2 + R^2} \\
 v_m &= Z i_m .
 \end{aligned}$$

O termo Z , conhecido como impedância de um circuito de corrente alternada é a razão entre a voltagem aplicada através do circuito e a amplitude da corrente que flui no mesmo. A impedância do circuito é:

$$Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (41)$$

Concluimos então:

$$v_m = Z i_m. \quad (42)$$

A equação (42) nos dá a amplitude da voltagem através de um circuito de corrente alternada. Sabemos que $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ e $X_L = \omega \cdot L$, logo a impedância para um circuito RLC é dada por:

$$Z = \sqrt{(R)^2 + \left[\omega \cdot L - \left(\frac{1}{\omega \cdot C} \right) \right]^2}. \quad (43)$$

Podemos observar pela equação (43) que a amplitude v_m da fonte de tensão que alimenta o circuito depende da frequência.

No diagrama de fasores da figura 19 o ângulo ϕ entre o fasor da voltagem e o fasor da corrente é o ângulo de fase da voltagem V da fonte em relação a corrente i . Logo, pelo diagrama:

$$\tan(\phi) = \frac{v_{Lm} - v_{Cm}}{v_{Rm}} = \frac{\chi_L i_m - \chi_C i_m}{R i_m}$$

$$\tan(\phi) = \frac{\chi_L - \chi_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

Para o circuito RLC, temos: $\tan(\phi) = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$.

A relação entre voltagem média e corrente é mantida para as grandezas eficazes. Para tal basta dividirmos a equação (42) por $\sqrt{2}$:

$$v_m = Z i_m$$

$$\frac{v_m}{\sqrt{2}} = Z \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$

Ou seja:

$$V_{eficaz} = Z i_{eficaz}$$

2.8.1) POTÊNCIA MÉDIA EM UM CIRCUITO RLC EM SÉRIE

Mostramos que em quando um circuito RLC com fonte senoidal (figura 20, repetida a seguir) é percorrido pela corrente elétrica $i = i_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$ a voltagem fornecida pela fonte é dada por $v = v_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$.

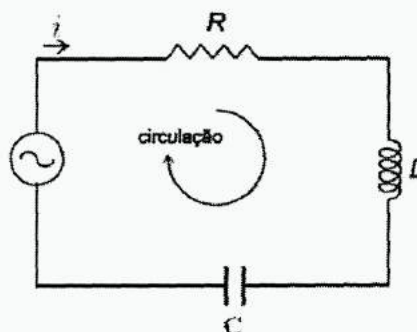


Figura 20

Logo a potência instantânea fornecida pela fonte é dada por:

$$\begin{aligned} p &= vi = v_m i_m \sin(\omega t + \phi_V) \sin(\omega t) \\ p &= v_m i_m (\sin(\omega t) \cos(\phi_V) + \sin(\phi_V) \cos(\omega t)) \sin(\omega t) \\ p &= 2V_{eficaz} I_{eficaz} \sin(\omega t)^2 \cos(\phi_V) + V_{eficaz} I_{eficaz} \sin(\phi_V) \sin(2\omega t) \\ p &= V_{eficaz} I_{eficaz} (1 - \cos(2\omega t)) \cos(\phi_V) + V_{eficaz} I_{eficaz} \sin(\phi_V) \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (44)$$

A expressão da potencia instantânea em termos das grandezas eficazes é:

$$p = V_{eficaz} I_{eficaz} (1 - \cos(2\omega t)) \cos(\phi_V) + V_{eficaz} I_{eficaz} \sin(\phi_V) \sin(2\omega t) \quad (45)$$

Na equação (45), se decomposemos a potência em duas componentes.

$$p_I = V_{eficaz} I_{eficaz} (1 - \cos(2\omega t)) \cos(\phi_V) \quad (46)$$

$$p_{II} = V_{eficaz} I_{eficaz} \sin(\phi_V) \sin(2\omega t). \quad (47)$$

O valor médio da parte p_I é denominado potencia é ativa P_{ATIVA} e é dado por:

$$P_{ATIVA} = \langle p_I \rangle = \langle V_{eficaz} I_{eficaz} (1 - \cos(2\omega t)) \cos(\phi_V) \rangle = V_{eficaz} I_{eficaz} \cos(\phi_V) \quad (48)$$

A potência ativa é a potencia média dissipada no resistor, uma vez que:

$$V_{eficaz} = Z I_{eficaz}$$

$$\cos(\phi_V) = \frac{v_{Rm}}{v_m} = \frac{R i_m}{Z i_m} \quad (49)$$

$$P_{ATIVA} = Z V_{eficaz} I_{eficaz}$$

$$P_{ATIVA} = Z \cos(\phi_V) I_{eficaz} I_{eficaz} = R I_{eficaz}^2$$

Em circuitos mais complexos o resistor pode ser substituído por outro elemento que consome potencia ativa.

A potência ativa é fisicamente a potência útil que está sendo transmitida ao longo do circuito. Ela é definida como valor médio de p_I e seu valor depende muito do fator de potência ($\cos(\phi_V)$) representado na equação (18). Fator de potência ($\cos \phi_V$) é um número adimensional entre 0 e 1.

O valor médio da segunda parte da potencia instantânea é nula, uma vez que:

$$\langle p_{II} \rangle = P_{REATIVA} = \langle V_{eficaz} I_{eficaz} \sin(\phi_V) \sin(2\omega t) \rangle = 0. \quad (50)$$

A amplitude máxima da parte p_{II} é denominada potência reativa.

$$P_{REATIVA} = V_{eficaz} I_{eficaz} \sin(\phi_V). \quad (51)$$

A potência reativa está associada à variação de energia eletromagnética armazenada no capacitor e no indutor, uma vez que:

$$\begin{aligned}
 U_{EM} &= U_B + U_C \\
 U_{EM} &= \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} \\
 \frac{dU_{EM}}{dt} &= L \frac{di}{dt} i + \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} \\
 \frac{dU_{EM}}{dt} &= v_L i + v_C i \\
 \frac{dU_{EM}}{dt} &= \chi_L i_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) i_m \sin(\omega t) + \chi_C i_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) i_m \sin(\omega t) \\
 \frac{dU_{EM}}{dt} &= \chi_L i_m^2 (\sin(\omega t) \cos(\omega t)) - \chi_C i_m^2 (\sin(\omega t) \cos(\omega t)) \\
 \begin{cases} \frac{dU_{EM}}{dt} = \frac{(\chi_L - \chi_C) i_m^2}{2} \sin(2\omega t) \\ \sin(\phi_V) = \frac{(\chi_L - \chi_C)}{Z} \end{cases} &\Rightarrow \frac{dU_{EM}}{dt} = \frac{Z i_m^2}{2} \sin(\phi_V) \sin(2\omega t) \\
 \frac{dU_{EM}}{dt} &= V_{\phi_{max}} I_{\phi_{max}} \sin(\phi_V) \sin(2\omega t) = P_{||} \quad (52)
 \end{aligned}$$

Logo aparte $p_{||}$ da potência instantânea é a potência trocada entre a fonte, o capacitor e o indutor. A sua amplitude máxima é denominada potência reativa.

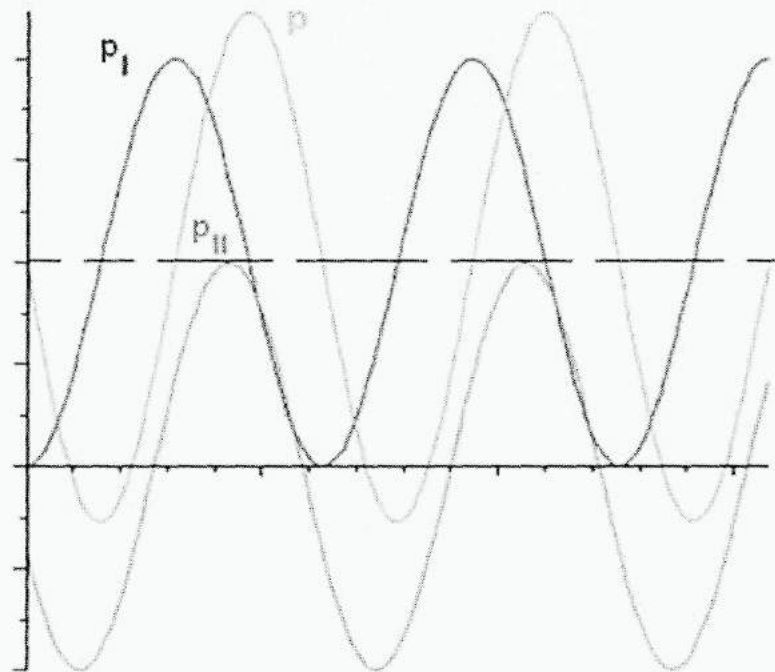


Figura 21

Na figura 21, a parte p_{11} tem valor médio nulo. Ela é a energia que está sendo utilizada para produzir os campos elétrico e magnético necessários para o estabelecimento da corrente elétrica alternada. Ela não pode ser transformada em trabalho útil. Com a finalidade de diferenciá-la da potência útil ela é expressa em uma nova unidade denominada voltampéres reativos VAR.

2.9) CIRCUITO RLC EM PARALELO [2]

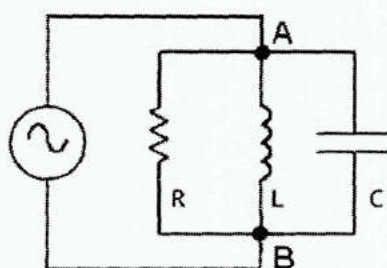


Figura 22

No tratamento dos circuitos de corrente alternada em série escolhemos colocar a fase inicial da corrente elétrica nula, porque nestes circuitos todos os elementos são atravessados pela mesma corrente. É fácil verificar que todos os resultados obtidos anteriormente não modificam se utilizamos a corrente elétrica como $i = i_m \text{sen}(\omega t + \phi_i)$ e a voltagem instantânea como $V = V_m \text{sen}(\omega t + \phi_v)$. Neste caso, o que denominamos por ϕ é a diferença entre a fase da voltagem e a fase da corrente elétrica, isto é, $\phi = \phi_v - \phi_i$.

No caso de circuitos de corrente alternada em paralelo, os elementos do circuito estão submetidos à mesma voltagem. Não perderemos generalidade se colocarmos a fase da voltagem nula, isto é, $V = V_m \text{sen}(\omega t)$. As correntes instantâneas em cada um dos elementos são dadas por :

$$\begin{aligned} i_R &= \frac{v_m}{R} \text{sen}(\omega t) = R i_m \text{sen}(\omega t) \\ i_C &= \frac{v_m}{\chi_C} \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ i_L &= \frac{v_m}{\chi_L} \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (53)$$

As formas das amplitudes máximas da corrente elétrica sugerem a introdução de uma nova grandeza física denominada admitância. A admitância é por definição o inverso da impedância, isto é, $Y = \frac{1}{Z}$. As correntes elétricas foram escritas a seguir

Utilizando este novo conceito.

$$\begin{aligned} i_R &= Y_R v_m \sin(\omega t) = R i_m \sin(\omega t) \\ i_C &= Y_C v_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ i_L &= Y_L v_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \end{aligned} \quad (54)$$

Pela Lei dos Nós a corrente elétrica i que chega ao ponto A da figura 22 é a soma das correntes elétricas que atravessa os elementos do circuito ligados em paralelo. A figura 23 mostra os fasores das correntes elétricas.

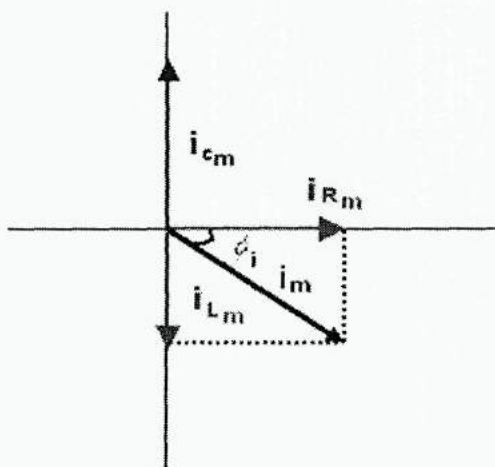


Figura 23

A corrente que chega ao ponto A é a soma das correntes que atravessam o resistor, o indutor e o capacitor. Ela é dada por: $i = i_m \sin(\omega t + \phi)$. Os valores da amplitude máxima desta corrente e da fase ϕ podem ser obtidos facilmente da figura 23.

$$\begin{aligned} i_m &= \sqrt{(i_{Cm} - i_{Lm})^2 + i_{Rm}^2} = \sqrt{(Y_L v_m - Y_C v_m)^2 + R^2 v_m^2} = Y v_m \text{ onde } Y = \sqrt{(Y_L - Y_C)^2 + R^2} \\ \tan(\phi) &= \frac{i_{Cm} - i_{Lm}}{i_{Rm}} = \frac{Y_L - Y_C}{R}. \end{aligned}$$

2.10) REPRESENTAÇÃO COMPLEXA DA CORRENTE, DA VOLTAGEM E DA POTÊNCIA [4]

Os livros de engenharia elétrica utilizam a representação complexa das correntes, das voltagens e da potência.

As relações entre as grandezas reais que utilizamos nos capítulos anteriores e as grandezas complexas estão a seguir:

$$\begin{aligned} i &= \sqrt{2} \operatorname{Im}(I \cdot e^{j\omega t}) \text{ onde } I_{\text{eficaz}} = |I| \text{ e } I = |I| e^{j\phi} \\ v &= \sqrt{2} \operatorname{Im}(V \cdot e^{j\omega t}) \text{ onde } V_{\text{eficaz}} = |V| \text{ e } V = |V| e^{j\phi} \end{aligned} \quad (55)$$

Nesta notação I e V são denominados fasores. Eles são representados no plano complexo. A seguir a representação fasorial do circuito RLC em série na representação complexa.

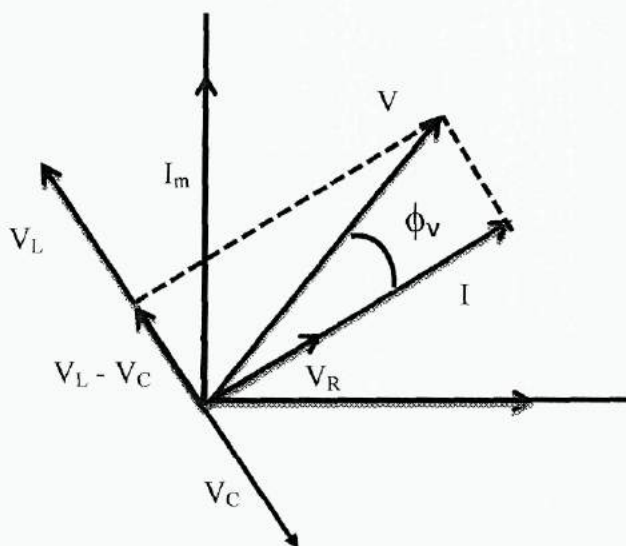


Figura 24

A nova impedância Z e admitância são definidas da seguinte forma:

$$Z = R + j(\chi_L - \chi_C)$$

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (56)$$

É fácil verificar que a impedância e a admitância definidas anteriormente são os módulos das grandezas complexas, isto é,

$$|Z| = \sqrt{Z Z^*} = \sqrt{R^2 + (\chi_L - \chi_C)^2} \quad (57)$$

$$|Y| = \sqrt{Y Y^*} = \sqrt{\frac{1}{Z} \frac{1}{Z^*}} = \frac{1}{|Z|}$$

Onde Z^* e Y^* são os complexos conjugados de Z e Y .

Também é definida a potência complexa S .

$$S = P + jQ, \text{ onde } P = P_{\text{ATIVA}} \text{ e } Q = P_{\text{REATIVA}}.$$

A seguinte demonstração mostra que a potência complexa pode ser reescrita como

$S = V \cdot I^*$, onde I^* é o complexo conjugado de I .

$$S = V \cdot I^* = |V| e^{j\phi} |I| e^{-j\phi}$$

$$S = |V| |I| e^{j(\phi - \phi)} = |V| |I| e^{j\phi} \text{ onde } \phi = \phi_V - \phi_I$$

$$S = |V| |I| \cos(\delta) + j |V| |I| \sin(\delta)$$

$$S = P + jQ.$$

(58)

A figura 25 mostra a representação da potencia S no plano complexo.

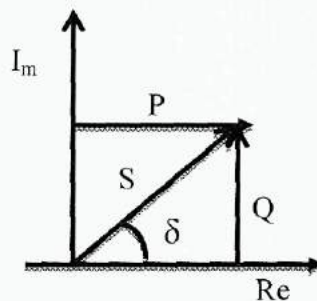


Figura 25

2.11) SISTEMA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICO [4]

O sistema de transmissão monofásico tem como desvantagem o caráter pulsante de potência. Podemos traçar um análogo hidráulico (figura 26) onde veremos um motor cujo eixo é aplicado um conjugado pulsante. A figura 26 mostra o análogo hidráulico de um sistema monofásico.

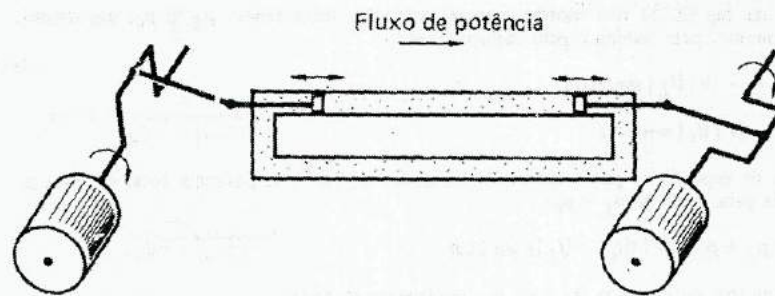


Figura 26

Uma considerável melhora do conjugado pode ser obtida por um arranjo do tipo mostrado na figura 27, que consiste em três sistemas monofásicos operando paralelamente. O eixo é projetado de tal maneira que o fluxo instantâneo total do fluido é zero. Isso significa que podemos dispensar as três linhas individuais de retorno. Poderíamos ainda ter usado um maior número de pistões para conseguir o mesmo efeito de regularização do conjugado que age no eixo. A figura 27 mostra o análogo hidráulico de um sistema trifásico.

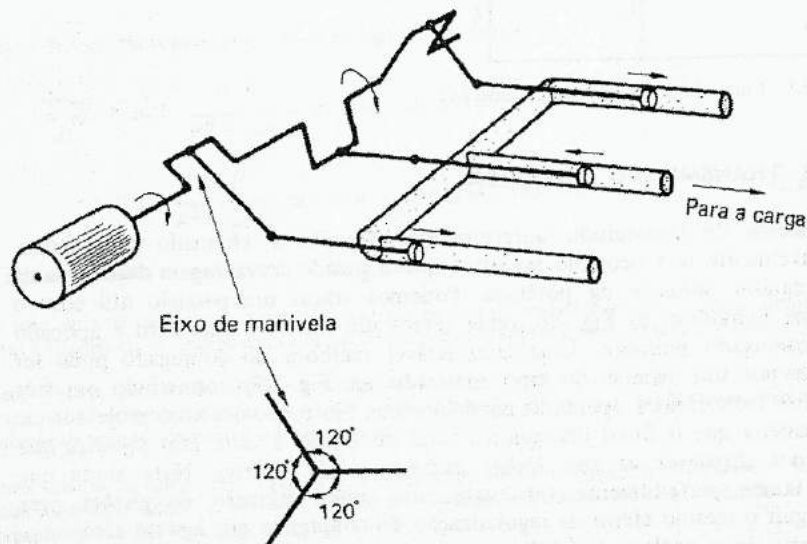


Figura 27

A partir desse análogo hidráulico, podemos chegar ao sistema de transmissão trifásica clássico, mostrado na figura 28. O gerador trifásico fornece as três tensões senoidais de fase:

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2} \cdot |V| \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \\ v_b &= \sqrt{2} \cdot |V| \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - 120^\circ) \\ v_c &= \sqrt{2} \cdot |V| \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (59)$$

Internamente, no gerador trifásico, as três fases estão ligadas a um ponto neutro, usualmente aterrado. As três tensões de fase v_a , v_b e v_c , são, portanto, geralmente medidas em relação à terra. A figura 28 mostra o sistema de transmissão trifásico.

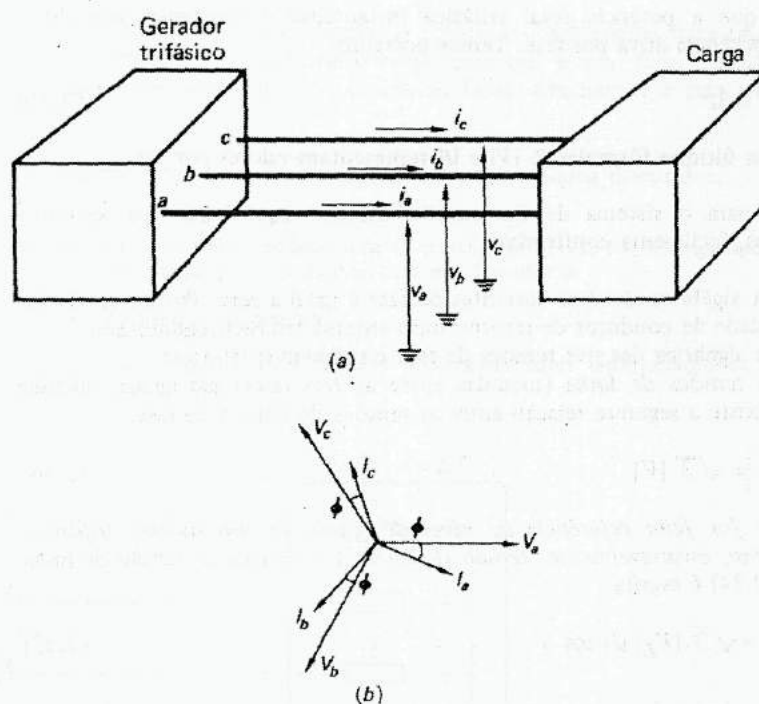


Figura 28

Se a carga for equilibrada ou simétrica, as três correntes de fase terão a forma simétrica:

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} |I| \cdot \text{sen}(\omega t - \phi) \\ i_b &= \sqrt{2} |I| \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ - \phi) \\ i_c &= \sqrt{2} |I| \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ - \phi) \end{aligned} \quad (60)$$

Na figura 28-b temos a representação fasorial das correntes e das tensões;

A potência trifásica total transmitida é igual à soma das potências individuais das fases, usando as equações (59) e (60) obtemos o caso equilibrado:

$$\begin{aligned} P_{3\phi} &= i_a \cdot v_a + i_b \cdot v_b + i_c \cdot v_c \\ P_{3\phi} &= 3 |V| |I| \cdot \text{sen}(\omega t)^2 \cos(\phi) + 3 |V| |I| \cdot \cos(\omega t)^2 \cos(\phi) \end{aligned} \quad (61)$$

Da relação trigonométrica temos:

$$\text{sen}^2(A) = 1 - \cos^2(A) \quad (62)$$

Substituindo (62) na equação (61), temos:

$$P_{3\phi} = 3 |V| |I| \cdot \cos(\phi) \quad (63)$$

A potência total trifásica instantânea é constante, valendo o triplo da potência ativa por fase. Portanto:

$$P_{3\phi} = 3.P \quad (64)$$

Nas equações (63) e (64), p , $|V|$ e $|I|$ representam valores por fase.

Para o sistema trifásico equilibrado, podemos confirmar:

1. A soma algébrica das três correntes de fase é igual a zero, portanto, não há necessidade de condutor de retorno num sistema trifásico equilibrado.
2. A soma algébrica das três tensões de fase é também igual a zero.
3. As três tensões de linha (medida entre as três fases) são iguais.

Podemos obter a relação entre as tensões de linha e de fase observando a figura 28-b. Para nossa demonstração iremos utilizar a tensão entre as fases a e b .

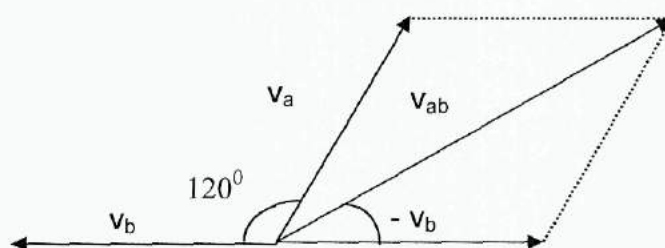


Figura 29

A tensão de linha que é a tensão entre duas fases pode se obtida diretamente do diagrama fasorial representado na figura 29. O fasor que representa da tensão de linha $v_a - v_b$ foi denominado na figura por V_{ab} . O seu módulo pode ser obtido pela Lei dos Cossenos. Pela figura-29 temos que:

$$\begin{aligned} V_{ab}^2 &= V_a^2 - V_b^2 + 2.V_a.V_b.\cos 60^\circ \\ V_{ab}^2 &= |V|^2 + |V|^2 + 2|V|^2.\cos 60^\circ \quad (66) \\ |V_{ab}| &= \sqrt{3}.|V| \end{aligned}$$

O fasor de linha V_{ab} será denominado de V_L . O seu módulo $|V_L|$ é o mesmo para duas linhas quaisquer. A relação entre o módulo do fasor de linha e o módulo da fasor da fase está descrita na equação (67).

$$|V_L| = \sqrt{3}.|V| \quad (67)$$

O nível de tensão de um sistema trifásico é escrito em função da tensão de linha, logo a equação (63) é escrita:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}.|V_L|.|I|. \cos(\phi) \quad (68)$$

4. Sendo constante a potência instantânea, somos tentados a considerar que a potência reativa não é importante num sistema trifásico. Não é esse o caso. Em cada fase a potência é do "tipo monofásico", como descrito na equação:

$$p = P.(1 - \cos(2\omega.t)) - Q.\text{sen}(2\omega.t) \quad (69)$$

A soma das três correntes de fase é zero, no entanto, elas têm muita importância em cada fase.

5. A equação (64) nos diz que a potência ativa trifásica é igual ao triplo da potência ativa monofásica. Somos então levados a perguntar se uma fórmula análoga, não seria aplicável à potência reativa, ou seja:

$$Q_{3\phi} = 3.Q \quad (70)$$

Verificamos imediatamente que o conceito de "potência reativa trifásica", $Q_{3\phi}$, tem tão pouco significado físico como teria o conceito de "corrente trifásica", $I_{3\phi} = 3.I$. No entanto, quando nos referimos à potência reativa num sistema trifásico, sempre a exprimimos como "potência trifásica", de acordo com a equação (70). A única razão para isto é obter simetria entre as potências ativa e reativa.

6. Devido à completa simetria entre as três fases, é suficiente, para análise, determinar a corrente, a tensão e a potência em apenas uma fase, a "fase de referência". Conhecendo essas variáveis numa fase, imediatamente conhecemos seus valores nas demais fases. Chamamos isso de análise por fase.

2.12) INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO [4]

As linhas de transmissão, que são elementos essenciais de um sistema de transmissão de energia elétrica, têm resistência, indutância e capacitância.

A indutância das linhas de transmissão está associada à variação do campo magnético criado por elas. A figura mostra a configuração do campo magnético criado por duas linhas de transmissão.

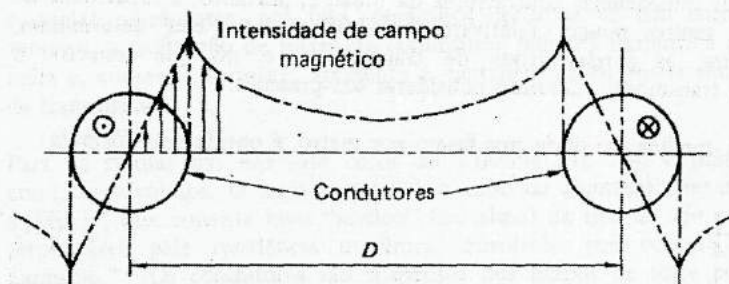


Figura 29

A propagação de ondas ao longo de uma linha de transmissão de dois fios é análoga à propagação num guia de ondas de placas planas paralelas. No caso limite de condutores perfeitos, a componente normal do campo elétrico em cada placa dá a densidade de carga superficial correspondente e as linhas de campo vão de uma placa a outra, ligando cargas iguais e opostas. Isto explica de forma simplificada o aparecimento de cargas elétricas nas linhas de transmissão.

A existência de cargas elétricas nos cabos de transmissão de energia elétrica dá origem à capacitância das linhas de transmissão. A figura a seguir mostra a distribuição do campo elétrico de duas linhas de transmissão

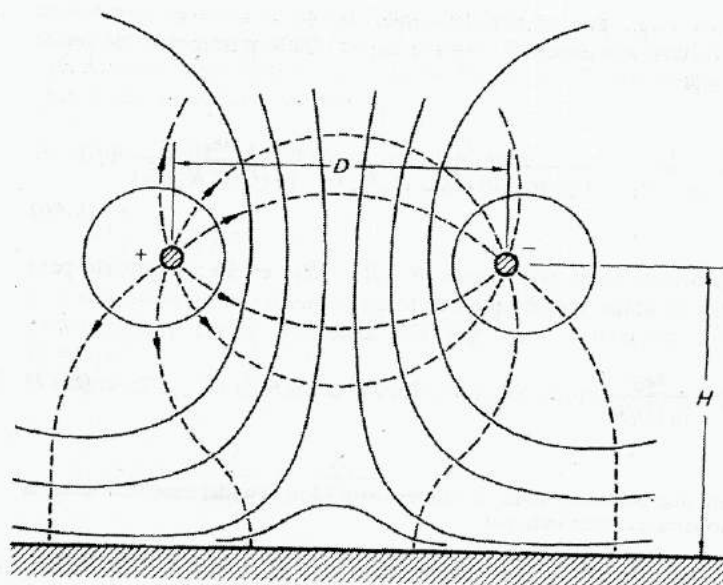


Figura 30

A resistência e a indutância da linha de transmissão constituem os elementos que formam a impedância em série, a capacitância constitui o principal elemento da admitância em paralelo da linha.

A figura mostra a representação esquemática de uma linha de transmissão.

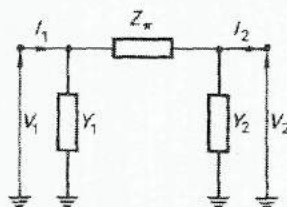


Figura 30

Os elementos em série, dos quais a indutância é o principal, limitam a corrente elétrica que pode circular na linha e, portanto, determinam fisicamente a transmissibilidade de potência. Os elementos em paralelo, dos quais a capacitância é o principal, representam o caminho de dispersão para correntes das linhas. Estas correntes de dispersão são proporcionais à tensão da linha, e portanto a importância dos elementos em paralelo cresce com o valor da tensão utilizada. Para tensões da ordem de 300 kV a 500 kV e extensões em de linha superiores a 320 km, a importância destes elementos torna-se fundamental para o bom funcionamento do sistema. No cabo de alta-tensão, onde a proximidade dos condutores resulta numa alta capacitância, em paralelo, por quilômetro, torna-se praticamente impossível o fluxo de grandes blocos de energia por distâncias superiores a 32 km ou 48 km, sem compensação especial.

Nesta monografia analisaremos de forma superficial os aspectos importantes de uma linha de transmissão que contém apenas indutores e resistores em série.

CAPÍTULO 3 – PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1) INTRODUÇÃO

Atualmente a energia consumida no mundo é obtida pela queima de combustíveis fósseis, pela transformação de energia mecânica em energia elétrica nas usinas hidrelétricas, pela transformação de energia nuclear em usinas nucleares etc. No Brasil, a grande parte da energia consumida é produzida em hidrelétricas.

Nas usinas hidrelétricas a energia elétrica é obtida através do aproveitamento do potencial hidráulico de um rio. Para que esse processo seja realizado é necessária a construção de usinas em rios que possuam elevado volume de água e que apresentem desníveis em seu curso. A produção de energia na hidrelétrica é mais barata do que outras como a energia nuclear e menos agressiva ambientalmente do que a do petróleo ou a do carvão, por exemplo. Porém a

instalação de usinas hidrelétrica causa impactos ambientais, como o alagamento da área em torno da represa e ela não pode ser armazenada, sendo consumida à medida que vai sendo gerada. Nesse caso, há continuamente o perigo de uma falta de energia acentuada (blackout).

Para termos a transformação da energia potencial da água represada em eletricidade precisamos levar em conta os seguintes elementos:

- a) Teremos tanto mais energia quanto mais água dispusermos para movimentar as turbinas e quanto maior for o seu desnível;
- b) Precisamos de dispositivos que convertam o movimento da turbina em eletricidade.

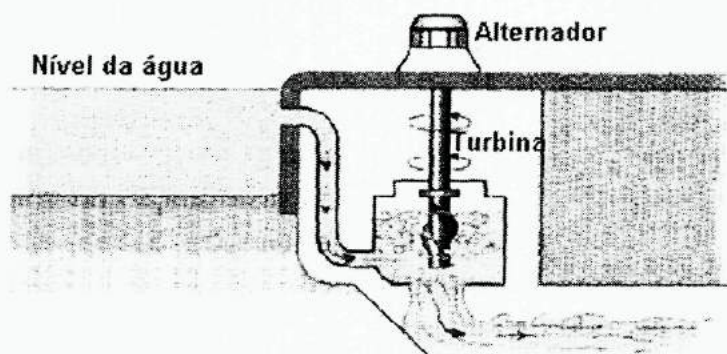


Figura 1

A energia potencial do desnível de uma queda de água represada nas usinas é canalizada sob pressão e movimenta turbinas. Nesse processo, ocorre a transformação de energia potencial (armazenada pela água represada) em energia mecânica (movimento das turbinas). Acoplados às turbinas temos os dispositivos geradores de energia elétrica. Então quanto mais água tivermos, mais rápido as turbinas giram e mais energia potencial das águas é transformada em energia elétrica pelos geradores. Então para que haja produção de energia elétrica, é necessário o uso do gerador para converter o movimento das turbinas em eletricidade. Neste capítulo discutiremos os princípios básicos dos geradores.

3.1.1) INDUÇÃO EM UMA ESPIRA PLANA EM ROTAÇÃO NUM CAMPO UNIFORME

[3]

A seguir mostraremos que uma voltagem alternada pode ser obtida girando-se uma espira em um campo magnético constante.

Na figura 2 foi representada uma espira plana com área S que gira com velocidade angular constante ω em um campo magnético uniforme com módulo igual a $|\vec{B}|$. O fluxo magnético sobre a área S limitada pela espira varia com o tempo gerando uma força eletromotriz induzida. Em um determinado instante de tempo, o fluxo através da área da espira é dado por:

$$\phi_B = |\vec{B}| \cdot S \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

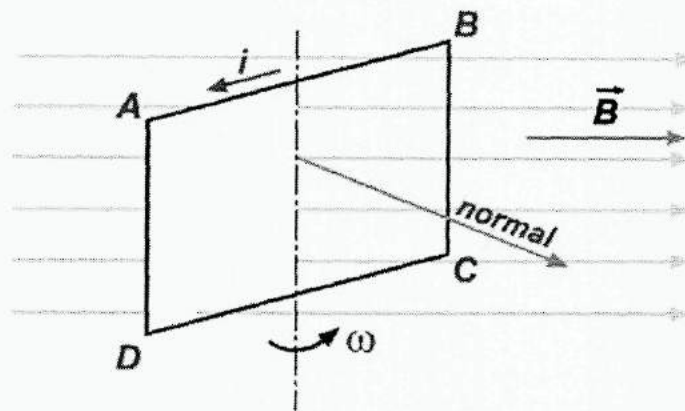


Figura 2

O fluxo varia proporcionalmente a $\cos(\omega t + \varphi)$, e segundo a Lei de Faraday a força eletromotriz induzida é dada por:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{d}{dt}(|\vec{B}| S \cos(\omega t + \varphi)) = -\omega |\vec{B}| S \sin(\omega t + \varphi) \\ \varepsilon &= \omega |\vec{B}| S \sin(\omega t + \varphi + \pi) = \varepsilon_m \sin(\omega t + \phi) \\ \varepsilon_m &= \omega |\vec{B}| S \quad \phi = \varphi + \pi \end{aligned} \quad (2)$$

Como ω , $|\vec{B}|$ e S são constantes, essa expressão indica que ε é diretamente proporcional a $\sin(\omega t + \phi)$.

Se ligarmos um resistor diretamente à espira, aparece uma corrente elétrica induzida dada por:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_m \sin(\omega t + \phi)}{R} = i_m \sin(\omega t + \phi). \quad (3)$$

Onde R é a resistência do condutor que forma a espira e $i_m = \frac{\varepsilon_m}{R}$.

3.1) GERADORES

Os dínamos são geradores de energia elétrica. Eles transformam energia mecânica em energia elétrica. Existem dínamos que são geradores monofásicos e os dínamos que são geradores trifásicos.

3.1.1) GERADOR MONOFÁSICO [3]

Um gerador monofásico é composto basicamente por uma bobina (construída com espiras fortemente compactadas) situada no interior de um campo magnético criado por um ímã. O princípio de funcionamento dos dínamos em geral, tanto de corrente contínua como de corrente alternada, é a indução eletromagnética em uma bobina que gira num campo magnético uniforme. Como discutimos anteriormente, à medida que a bobina gira é gerada uma força eletromotriz induzida. Se a bobina é ligada a um circuito elétrico ele é percorrido por uma corrente alternada.

Tanto no dínamo de corrente alternada como no de corrente contínua a bobina é percorrida por corrente alternada. A diferença entre eles está na maneira de colher essa corrente para fora do quadro. Essa captação da corrente para fora do quadro é feita por um dispositivo chamado coletor.

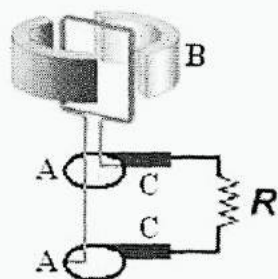


Figura 3-a

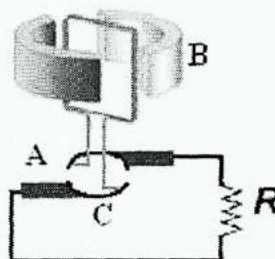


Figura 3-b

Na figura 3-a temos a representação de um dínamo coletor de corrente alternada. A bobina está conectada a dois anéis (A) que giram junto. O ímã (B) produz o campo magnético. Encostados a esses anéis existem dois pedaços de carvão C (condutor). O circuito externo com resistência R, onde vai ser utilizada a corrente, é ligado a esses pedaços de carvão. A corrente que se obtém pelo quadro girando no campo magnético passa para os anéis e depois para o carvão e finalmente passa pelo circuito. Nesse dispositivo, quando a corrente elétrica muda de sentido no quadro, também muda de sentido no circuito externo, isto é, ela é captada como corrente alternada no circuito externo. Coletor é o nome que se dá ao conjunto dos anéis e pedaços de carvão. Os pedaços de carvão são chamados escovas.

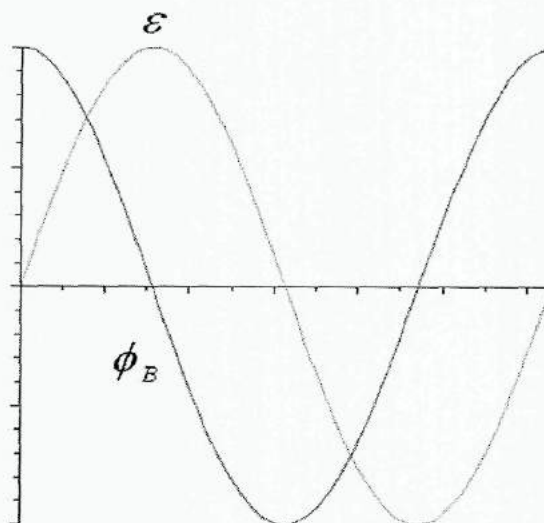


Figura 4

O comportamento da curva da força eletromotriz na figura 4 é senoidal, a corrente no circuito externo é uma corrente alternada, por esse motivo este esquema da figura 3-a é conhecido como alternador.

Na figura 3-b temos o mesmo esquema descrito no exemplo anterior, porém agora ao invés de dois anéis temos dois semi-anéis A. Cada semi-anel é ligado a uma ponta da bobina que gira. Os pedaços de carvão são fixos, e ligados ao circuito externo com resistência R. Quando os semi-anéis giram ficam apertados contra os pedaços de carvão raspando neles. Então a cada meio período, um semi-anel está em contato com um pedaço de carvão diferente. A posição dos carvões é ajustada de tal modo que, no instante em que a corrente muda de sentido na bobina, há troca de contato entre os carvões e os semi-anéis. A figura 5 mostra o gráfico do fluxo magnético através da bobina e da força eletromotriz obtida no coletor.

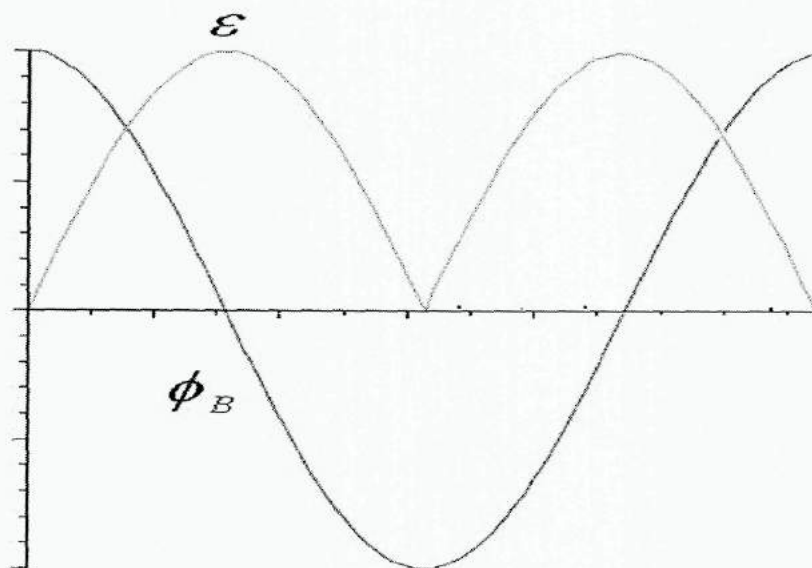
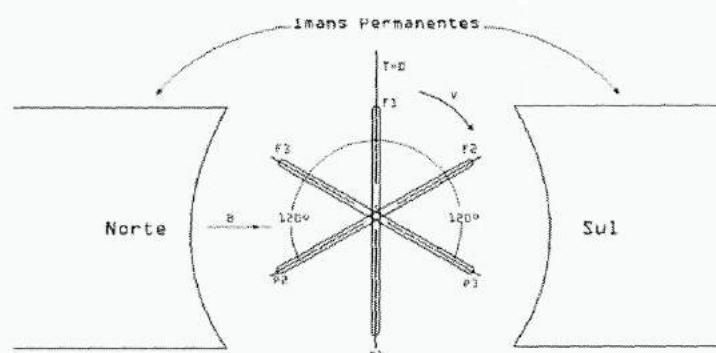


Figura 5

Pelo gráfico da figura 5, a força eletromotriz obtida caracteriza uma corrente que está sempre no mesmo sentido, isto é, a corrente é contínua. Lembrando que a corrente que nos referimos é a obtida no coletor, ou seja, fora da bobina. Este esquema da figura 3-b se chama comutador.

Os dínamos são denominados geradores monofásicos.

3.1.1) GERADOR TRIFÁSICO [4]



Sistema Trifásico de bobinas

Fig. 5a

Figura 6

Em um gerador trifásico existem três bobinas que giram em um campo magnético constante. As bobinas são construídas de tal forma que a voltagem nos terminais de cada uma delas são dadas por:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_o \cos(\omega t + \phi) \\ V_2 &= V_o \cos(\omega t + 120^\circ + \phi) \\ V_3 &= V_o \cos(\omega t + 240^\circ + \phi). \end{aligned} \quad (4)$$

CAPÍTULO 4 – TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1) INTRODUÇÃO [4]

Transmissão de energia elétrica é o processo de transportar energia entre dois pontos. O transporte é realizado por linhas de transmissão de alta potência, conectando uma usina geradora de energia elétrica ao consumidor. Basicamente a transmissão de energia é dividida em duas faixas: a transmissão em potências mais elevadas, ligando as usinas aos grandes centros, e a distribuição, usada dentro de centros urbanos.

Existem sistemas de transmissão de energia elétrica que utilizam correntes contínuas em alta tensão (CCAT) e sistemas que utilizam corrente alternadas em alta tensão (CAAT). O gráfico da figura 1 mostra a relação entre custo e distância para linhas de transmissão em correntes contínua e alternada.

Comparação do custo econômico entre CC e CA.

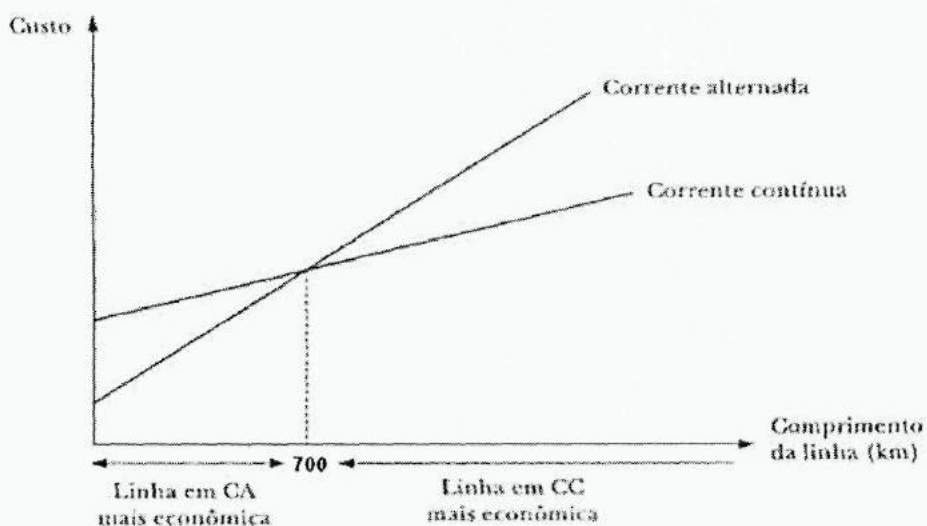


Figura 1

Fica claro pelo gráfico que os custos para a transmissão de energia a longa distância é menor quando se utiliza correntes contínuas. Em países de grandes dimensões, como a União Soviética, os Estados Unidos e o Brasil, essas condições são fáceis de ocorrer e, por isso mesmo, o sistema de transmissão em corrente contínua já se encontra em implantação nestes países. Por exemplo, no Brasil, a energia gerada pela Hidrelétrica de Itaipu é transmitida pela Subestação de Foz do Iguaçu para Ibiúna, em corrente contínua. Depois de percorrer mais de 790 km, a energia é transformada em corrente alternada de 60 Hz, na Subestação de Ibiúna, e distribuída para Campinas, Guarulhos, Tijuco Preto, Interlagos e Bateias.

Neste trabalho discutiremos de forma qualitativa apenas a transmissão de energia com correntes alternadas em alta tensão.

4.2) TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA [4]

A transmissão em corrente alternada é hoje utilizada universalmente e mostrou-se adequada para transmitir e distribuir energia elétrica.

Quando a corrente elétrica percorre essas linhas, uma parte considerável da energia gerada é dissipada nelas, por efeito Joule, transformando-se em calor. O calor gerado não é aproveitado pelos centros consumidores, eles recebem apenas uma fração da energia elétrica gerada nas usinas. A potência gerada pelas usinas é dada pela equação;

$$P_1 = v.i \quad (1)$$

A perda por Efeito Joule é proporcional a resistência nos fios e à corrente elétrica que o atravessa.

$$P_2 = r.i^2 \quad (2)$$

A potência que chega aos consumidores é dada pela diferença entre P_1 e P_2 . A perda por efeito Joule nos fios deve ser a menor possível. Para isto, temos que diminuir os valores de r e i na equação (2). O valor de r só pode ser diminuído se for aumentada a área de secção reta dos fios, isto é, usando-se fios mais grossos. Entretanto, existe um limite para este procedimento, pois cabos muito grossos, além de terem custo elevado, tornariam a rede de transmissão extremamente pesada. Assim, a solução mais adequada é procurar reduzir o valor da corrente i a ser transmitida.

Para que não haja uma redução da potência gerada na usina, a diminuição da corrente transmitida deve ser compensada por uma elevação da voltagem v da equação (1). Então, para reduzir as perdas por efeito Joule nas linhas de transmissão de energia elétrica, ela deve ser feita com baixa corrente e alta voltagem. Por isso, a voltagem gerada em uma usina elétrica, antes da transmissão, tem seu valor elevado para vários milhares de volts antes de ser distribuída aos consumidores.

Essas alterações de voltagem podem ser feitas com relativa facilidade, usando transformadores. O uso de corrente alternada para transmissão de energia tornou-se possível pela capacidade dos transformadores elevarem a tensão e reduzir a corrente elétrica, reduzindo ao quadrado as perdas na linha pelo Efeito Joule.

4.2.1) TRANSFORMADORES [3]

Como foi descrito na seção anterior, os transformadores são responsáveis por alterar a voltagem da energia elétrica transmitida. A Terminologia Brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define o transformador como: *Um dispositivo que por meio da indução eletromagnética, transfere energia elétrica de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário), usando a mesma frequência, mas, geralmente, com tensões e intensidades de correntes diferentes.*

O transformador, na sua forma mais simples, consiste de dois enrolamentos de fio (o primário e o secundário), que envolvem os braços de um quadro metálico (o núcleo).

Vamos analisar o transformador ideal, onde desprezamos as perdas por calor no núcleo de ferro e onde consideramos que os fluxos magnéticos nas espiras que compõem a bobina primária e secundária são iguais. Logo temos que:

$$\begin{aligned} |\phi_{BP}| &= |\phi_{BS}| \Rightarrow \\ |\mathcal{E}_{\text{espira}P}| &= \frac{d\phi_{BP}}{dt} = \frac{d\phi_{BS}}{dt} = |\mathcal{E}_{\text{espira}S}| \quad (1) \end{aligned}$$

Também consideraremos, por simplicidade, que a bobina secundária está aberta. Como mostra a figura 2.

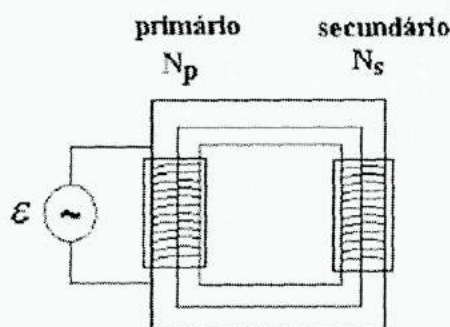


Figura 2

Se a bobina primária tem N_p espiras e voltagem V_p e a bobina secundária tem N_s espiras e voltagem V_s , as voltagens nas espiras são dadas por:

$$\begin{aligned} |\mathcal{E}_{\text{espira}P}| &= \frac{V_P}{N_P} \\ |\mathcal{E}_{\text{espira}S}| &= \frac{V_S}{N_S} \end{aligned} \quad (2)$$

Logo temos que:

$$\frac{V_P}{N_P} = \frac{V_S}{N_S} \quad (3)$$

Concluimos então que um transformador pode elevar ou diminuir voltagens em corrente alternada. Veja o vídeo do transformador no DVD que acompanha esta monografia.

Nas usinas, as voltagens são geradas por um gerador (com cerca de 10.000 V), o seu valor é elevado entre 150.000 até 400.000 V por meio de transformadores existentes na subestação próxima à usina. Com esta alta voltagem, a energia elétrica é transportada a longas distâncias até chegar ao centro consumidor (uma cidade, por exemplo), nas proximidades do qual se localiza uma outra subestação. Neste local os transformadores reduzem a voltagem para os valores (cerca de 13.800 V) com os quais ela é distribuída aos consumidores industriais e pelas ruas da cidade. Finalmente, nas proximidades das residências existem transformadores (nos postes da rua) que reduzem ainda mais a voltagem (para 127 V ou 220 V), de modo que ela possa ser utilizada, sem riscos, pelo consumidor residencial.

4.3) A ESTRUTURA DA REDE DE ENERGIA ELÉTRICA [4]

O processo de transmissão de energia com corrente alternada se dá em vários níveis de tensão separados por transformadores. Nível de distribuição (secundária e primária)

1. Nível de subtransmissão
2. Nível de transmissão e a rede (pool).

A figura 3 mostra uma rede de distribuição de energia com os seus diversos níveis, de maneira simplificada.

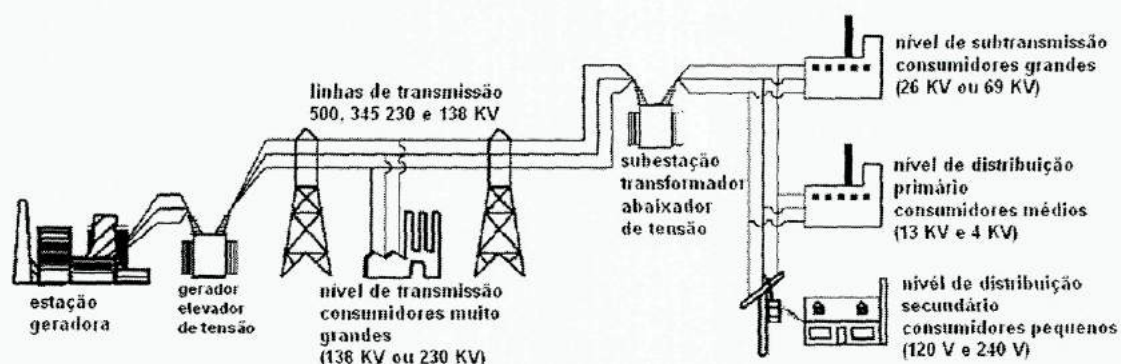


Figura 3

A figura 4 mostra uma rede de distribuição de energia elétrica com a notação simbólica utilizada na área da engenharia de sistemas de energia elétrica.

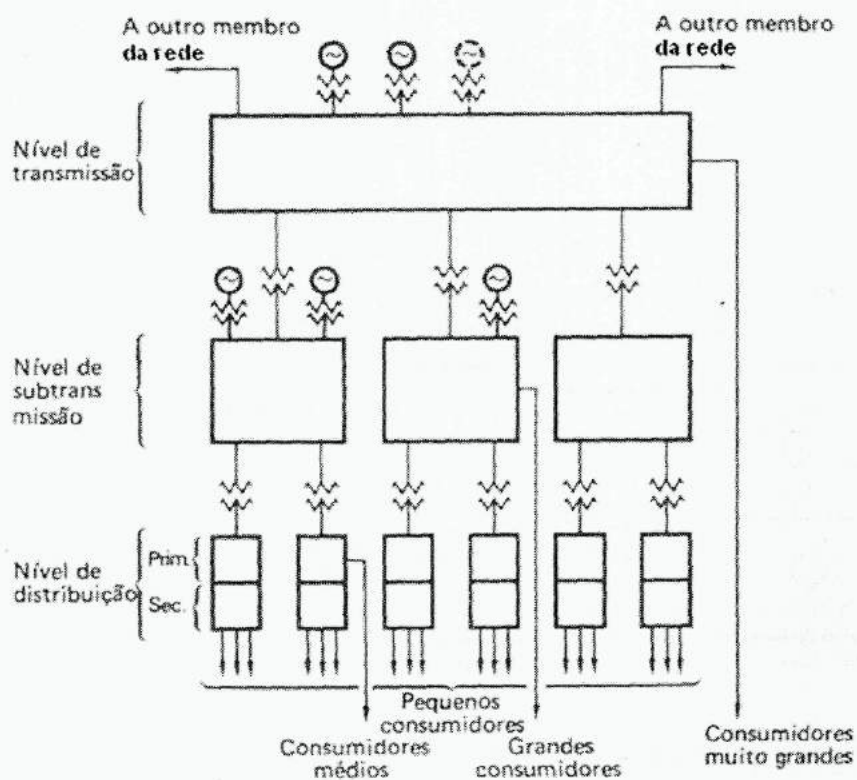


Figura-4

4.3.1) NÍVEL DE DISTRIBUIÇÃO

Os circuitos do nível de distribuição constituem as malhas mais refinadas da rede total. Usualmente dois níveis de distribuição são usados:

1. A tensão primária, ou de alimentação (13800 V)
2. A tensão secundária ou de consumidor (127/220 V).

Os circuitos de distribuição, alimentados a partir das subestações de distribuição (estação de transformadores), fornecem energia aos consumidores pequenos (domésticos) e médios (pequenas indústrias e comércio).

4.3.2) NÍVEL DE SUB-TRANSMISSÃO

Os circuitos de subtransmissão distribuem energia às subestações de distribuição localizadas numa certa área geográfica, num nível de tensão que, varia em geral, entre 11 kV a 138 kV. Eles recebem energia diretamente da barra do gerador na estação de geração ou por meio de subestações de potência. Os grandes consumidores são servidos diretamente por essas estações.

O papel de um sistema de subtransmissão é basicamente o mesmo que o de um sistema de distribuição, exceto que a área geográfica servida é maior e a energia é distribuída em maiores blocos, com níveis de potência e tensão maiores.

O sistema de transmissão difere, tanto funcionalmente quanto em relação às características dos sistemas de distribuição e subtransmissão. Enquanto estes dois últimos simplesmente retiram energia de uma única fonte e as transmitem a cargas individuais, a função do sistema de transmissão é bem diferente. Ele não somente lida com maiores blocos de energia e potência, como também interliga as estações geradoras e todos os pontos de maior carga do sistema. A energia pode ser conduzida em qualquer direção desejada, nas várias malhas do sistema e transmissão, de modo a corresponder às condições de funcionamento mais econômico ou a melhor servir os objetivos técnicos. Por meio de interconexões, a energia pode fluir de um a outro dos sistemas de potência que pertençam ao mesmo pool.

Diferença fundamental nos objetivos do sistema de transmissão comparado com o dos de subtransmissão e de distribuição é evidenciada na estrutura da rede. Enquanto os dois últimos são geralmente (mas não sempre) de estrutura radial (Figura 5-a), o primeiro costuma ter estrutura de anel (Figura 4-b).

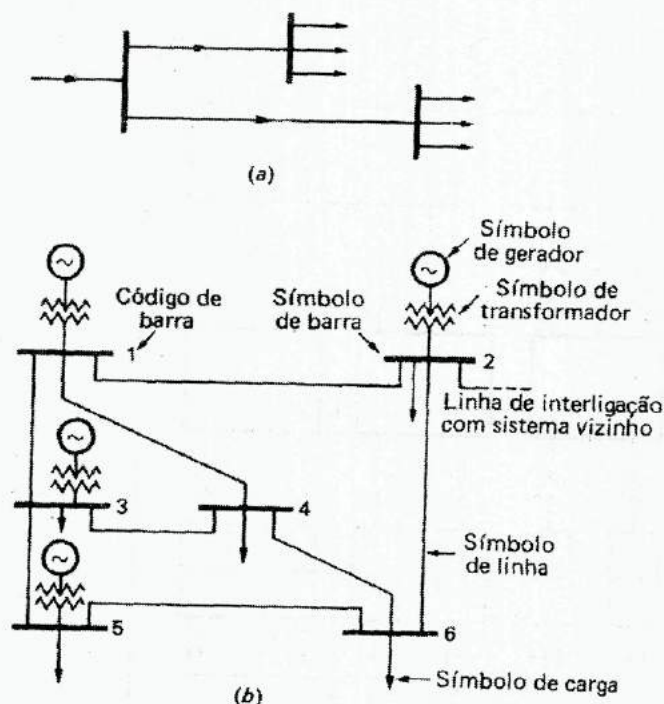


Figura 5 Sistema radial (a) e em anel (b)

As cargas para o sistema de transmissão, em geral, são equipamentos ou conjunto de equipamentos que retiram energia do circuito. Ela pode variar de uma lâmpada de poucos watts até um motor de indução de muitos megawatts.

Discutiremos a seguir de forma qualitativa e superficial alguns aspectos da capacidade de transmissão.

4.4) CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DA REDE [4]

Um fator crítico no projeto de funcionamento de um sistema de transmissão é a capacidade de carga de uma determinada linha de transmissão.

Quando quisermos conduzir energia elétrica por meio de uma linha de transmissão, deveremos esperar, por nenhum outro motivo que não por pura intuição, a existência de um limite para a quantidade de energia a ser transmitida pela linha. Nesta seção investigaremos tais limites para condições estáticas, isto é, deduziremos a capacidade estática de transmissão. A hipótese que faremos é que, aumentando lentamente a carga forçamos um aumento lento da energia que está sendo transmitida, forçando um aumento lento da energia que está sendo transmitida pela linha em estudo.

Para fazer um estudo simplificado de alguns problemas de carga de uma linha de transmissão estudaremos problemas provenientes da variação de carga na linha da Figura 6.

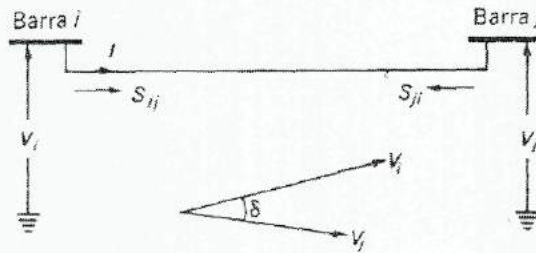


Figura 6

O trecho de linha de transmissão mostrado na figura 6 pode representar uma linha de transmissão ligando duas barras i e j , de um sistema maior. Determinaremos uma expressão para a potência (ativa e reativa) transmitida pela linha nas seguintes condições:

1. As duas tensões de barra v_i e v_j são conhecidas e expressas em valores de fase.
2. A linha possui uma impedância em série $Z = R + j\chi$, por fase.
3. A corrente de linha I é a mesma ao longo da linha. Para linhas "longas" isso não é muito exato.
4. Devido às perdas na linha, as potências transmitidas, mediassem cada extremo da linha, não serão iguais. Designamos as potências da linha por S_{ij} e S_{ji} , conforme sejam medidas nos extremos i e j , respectivamente. Ambas são consideradas positivas quando se afastam das respectivas barras.

Temos:

$$I = \frac{v_i - v_j}{Z} \quad (1)$$

Obtemos para as potências da linha:

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = v_{ij} I^* = \frac{(v_i^* - v_j^*)}{Z^*} = \frac{|v_i|^2 - |v_i||v_j|e^{j(\delta_i - \delta_j)}}{R - j\chi} \quad (2)$$

$$S_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = v_{ji} (-I^*) = \frac{-(v_i^* - v_j^*)}{Z^*} = \frac{|v_j|^2 - |v_i||v_j|e^{j(\delta_i - \delta_j)}}{R - j\chi}$$

(3)

Introduzindo o ângulo de potência:

$$\delta \approx \delta_i - \delta_j \quad (4)$$

δ é o ângulo de fase entre as duas tensões de barra (como mostra a figura 6). Substituindo δ nas equações (2) e (3), obtemos, após separar as partes reais e imaginárias:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= \frac{1}{R^2 + \chi^2} (R|v_i|^2 - R|v_i||v_j|\cos\delta + \chi|v_i||v_j|\sin\delta) \\ Q_{ij} &= \frac{1}{R^2 + \chi^2} (\chi|v_i|^2 - \chi|v_i||v_j|\cos\delta - R|v_i||v_j|\sin\delta) \\ P_{ji} &= \frac{1}{R^2 + \chi^2} (R|v_j|^2 - R|v_i||v_j|\cos\delta - \chi|v_i||v_j|\sin\delta) \\ Q_{ji} &= \frac{1}{R^2 + \chi^2} (\chi|v_j|^2 - \chi|v_i||v_j|\cos\delta + R|v_i||v_j|\sin\delta) \end{aligned} \quad (5)$$

Um fator crítico no projeto e no funcionamento de um sistema de transmissão é a capacidade de carga de uma linha de transmissão específica.

Quando quisermos conduzir energia elétrica por meio de uma linha de transmissão, deveremos esperar, por nenhum outro motivo que no por pura intuição, a existência de um limite para quantidade de energia a ser transmitida pela linha. Investigaremos tais limites, através da dedução da capacidade estática de transmissão, ou limite de estabilidade estática, de uma linha de transmissão. Se aumentarmos lentamente a carga, forçamos um aumento lento da energia que está sendo transmitida pela linha em estudo. Para sermos específicos consideremos a linha da figura 6, para qual já deduzimos expressões para potência transmitida.

Consideraremos que a linha não tem perdas, ou seja, desprezaremos a resistência R em face da reatância χ . Sem perdas ativas na linha, as potências ativas, no "terminal de saída" e no "terminal de entrada" deverão ser iguais. Para $R = 0$, as equações (5) nos dão, para potência ativa transmitida:

$$P_{ij} = -P_{ji} = \frac{|v_i||v_j|\sin\delta}{\chi} \quad (6-a)$$

Sabemos que δ representa o ângulo de fase entre v_i e v_j . Se as tensões nas barras forem mantidas constantes (através da manipulação da potência reativa) podemos escrever as equações (6-a) como:

$$P_{ij} = -P_{MAX}\sin\delta \quad (6-b)$$

Onde:

$$P_{MAX} = \frac{|v_i||v_j|}{\chi} = \text{constante (7)}$$

A única maneira pela qual podemos afetar o valor da potência transmitida é obviamente, mudando o ângulo de fase δ . Quando um aumento de carga força o crescimento da potência transmitida, isso ocorre por meio de um aumento do ângulo de fase entre v_i e v_j . A figura 7 mostra a relação entre a potência transmitida e δ . O sentido do fluxo de potência é determinado simplesmente pela tensão, v_i ou v_j , que esteja adiantada em relação à outra.

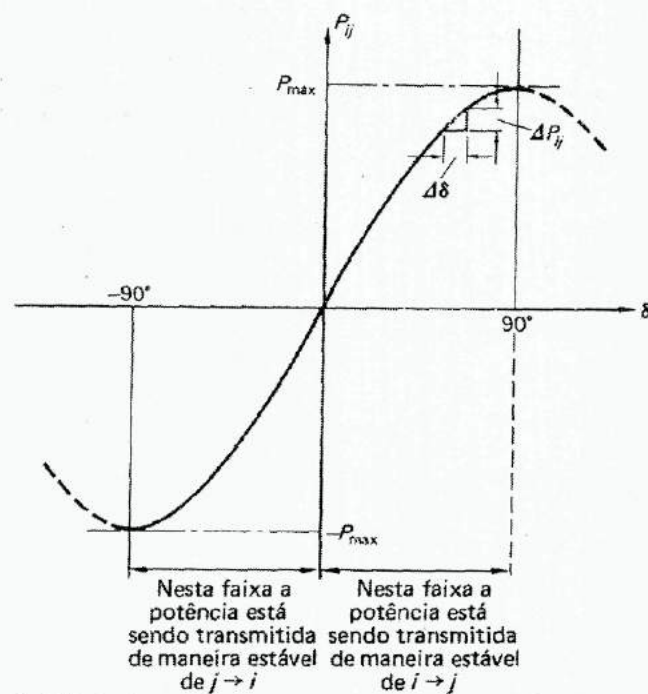


Figura 7

Quando a potência transmitida atinge o valor P_{MAX} , o ângulo δ atinge 90° e qualquer incremento fornecido à carga não resultará num aumento de potência transmitida. Na verdade, quando um incremento de carga força δ para além de 90° , a potência transmitida começa a decrescer. Nesse ponto, chamado de limite de estabilidade estática, perdemos o sincronismo entre as barras i e j .

Podemos obter uma boa analogia mecânica considerando o mecanismo de transmissão da figura 8.

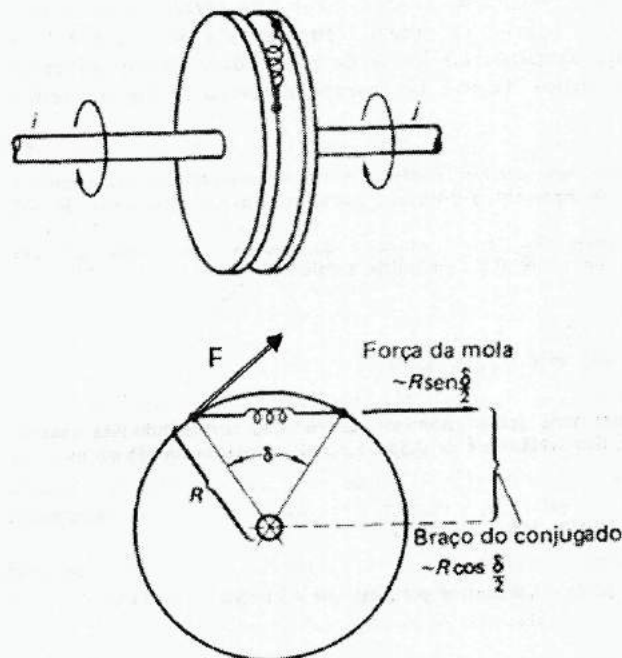


Figura 8

A transmissão de conjugado entre os dois eixos i e j (correspondentes às barras i e j .) é feita por meio de dois discos acoplados por meio de uma mola. Se considerarmos desprezível a distância entre os discos e se a força da mola for proporcional a seu comprimento, então o conjugado T entre os eixos será igual a:

$$T = \text{força} \times \text{braço do conjugado} = (K \cdot R \cdot \sin \frac{\delta}{2}) \cdot (R \cdot \cos \frac{\delta}{2}) = K \cdot R^2 \cdot \sin \delta \quad (\text{N/m}) \quad (8)$$

Onde K é a constante elástica da mola, medida em newton por metro. A potência mecânica transmitida P_{MECH} é igual a $\omega_{MECH} \cdot T$ e então temos:

$$P_{MECH} = \omega_{MECH} \cdot \frac{K \cdot R^2}{2} \sin \delta = P_{MAX} \sin \delta \quad (\text{W}) \quad (9)$$

A comparação das equações (6) e (9) confirma a analogia entre o sistema de transmissão elétrico e mecânico.

Na equação (6) a máxima potência ativa P_{MAX} representa a capacidade de transmissão estática da linha, funcionando nas condições assumidas (com tensões constantes nas barras). Notamos duas importantes características de P_{MAX} :

1. Cresce com o quadrado da tensão de transmissão.
2. É inversamente proporcional à reatância da linha.

Novamente encontramos uma boa razão para uma alta tensão de transmissão. Em nossos sistemas de transmissão uma baixa reatância em série é também uma característica desejável.

Isso pode ser obtido com o uso de linhas em paralelo, usando feixes de condutores ou inserindo capacitores em série.

O aumento incremental da potência transmitida, ΔP_{ij} , causado pelo pequeno incremento $\Delta\delta$, no ângulo δ , é numa medida da "firmeza elétrica" da linha de transmissão. Esses incrementos são mostrados na figura 7. Definimos coeficiente de "firmeza" ou coeficiente de sincronismo, por:

$$T_{ij} \approx \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta\delta} \approx \frac{d\Delta P_{ij}}{d\Delta\delta} = P_{MAX} \cdot \cos\delta \quad (10)$$

T_{ij} é medido em megawatts por radiano (análogo a constante de mola). Note que δ aproxima-se de $\pm 90^\circ$, o coeficiente aproxima-se de zero. Por esta razão, nossas linhas raramente funcionam com ângulos de potência superiores a 30° ou a 45° . À medida que nos aproximamos do limite de estabilidade, o sistema vai se tornando eletricamente menos "firme".

4.4.1) CARACTERÍSTICAS DA CARGA

Em geral, o termo carga refere-se a um equipamento ou conjunto de equipamentos que retira energia do circuito. Na prática, a carga pode variar desde uma lâmpada de poucos watts até um motor de indução de muitos megawatts. O sistema de potência, deve ser capaz de fornecer energia a todas elas. É possível dividir as diversas cargas nas seguintes categorias.

1. Motores (incluindo os motores estacionários, na indústria, e os moveis, em equipamentos de transporte, isto é, trens etc).
2. Equipamentos de aquecimento.
3. Diversos equipamentos eletrônicos.
4. Equipamentos de iluminação.

Do ponto de vista elétrico os diversos equipamentos são caracterizados por grandes diferenças o que diz respeito a:

1. Tamanho.
2. Simetria (monofásico ou trifásico).
3. Constância de carga (em relação a tempo, frequência e tensão).
4. Ciclo de funcionamento (uso regular ou aleatório).

Por exemplo, cargas industriais têm, em geral, poucas semelhanças com cargas domésticas, no que concerne a todas as categorias acima. Um certo tipo de carga industrial pode ser constituído, em 95%, de grandes motores de indução trifásicos com considerável constância de carga e um ciclo de funcionamento bem determinado (por exemplo, de oito da manhã às cinco da tarde). Uma carga doméstica típica, ao contrário, consiste principalmente de aparelhos monofásicos operados, aleatoriamente, pelas donas de casa. Embora as cargas

individuais possam ser de caráter inteiramente aleatório, certa configuração média é "vista" pelos transformadores de distribuição. No nível de subtransmissão essa situação é ainda mais acentuada. Finalmente, no nível de transmissão alcançamos uma configuração praticamente previsível. No projeto de nível de distribuição, repartimos as cargas monofásicas entre as três fases.

De maneira resumida, damos as seguintes regras, que caracterizam as cargas típicas dos sistemas:

1. Embora individualmente do tipo aleatório, as cargas concentradas ou compostas, encontradas nos níveis de subtransmissão e de transmissão, são de caráter altamente previsível.
2. Essas cargas concentradas variam com o tempo de maneira previsível. A figura 9 mostra uma variação típica de carga para uma companhia de tamanho médio. Em geral, há uma variação considerável, não apenas durante as horas do dia, mas também entre os dias da semana e os domingos e feriados e ainda entre as diferentes estações do ano
3. Muito embora as cargas sejam variáveis com o tempo, tais variações são relativamente lentas. De minuto a minuto temos carga quase constante. Um minuto é um período de tempo longo, comparado com as constantes de tempo elétricas do sistema de potência e isso nos permite considerar o sistema funcionando em regime permanente – um regime permanente que lentamente "varia" durante as horas do dia (funcionamento quase estático).
4. A carga típica sempre consome potência reativa. A razão para isso é que as cargas motoras são, na grande maioria dos casos, um importante componente da carga total. Os motores são sempre (com exceção das máquinas síncronas superexcitadas) indutivos.
5. A carga típica é sempre simétrica. No caso de motores grandes, essa simetria é automática, posto que eles são sempre projetados para funcionamento trifásico equilibrado. No caso de equipamentos monofásicos, a simetria provém da distribuição intencional entre as fases e de efeitos estatísticos.

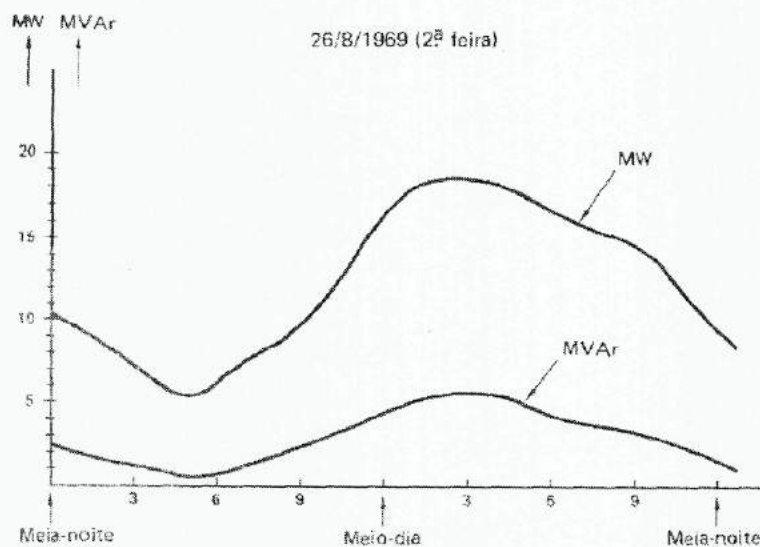


Figura 9

4.4.2) DEPENDÊNCIA DA CARGA COM TENSÃO E FREQUÊNCIA

Em certos estudos de sistemas é necessário saber como as diversas cargas das barras variam com a frequência e com a tensão. Se a carga consiste numa impedância, é simples achar essas relações analiticamente. Por exemplo considere a carga RL em série na figura 10.

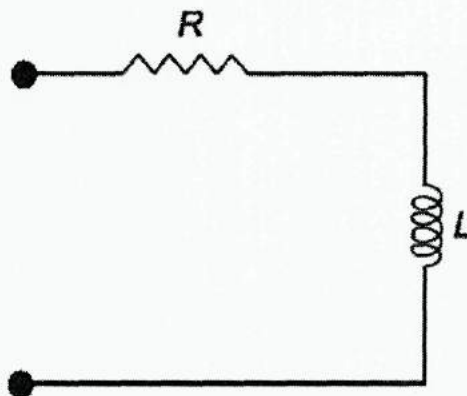


Figura 10

Da expressão:

$$P + j.Q = |V|^2 Y^* \quad (1)$$

Obtemos, nesse caso, as seguintes fórmulas:

$$P = \frac{R|V|^2}{R^2 + (2\pi \cdot f \cdot L)^2} \quad (2)$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot f \cdot L|V|^2}{R^2 + (2\pi \cdot f \cdot L)^2}$$

As fórmulas revelam que, tanto P quanto Q, crescem com o quadrado da tensão, característica típica das cargas constituídas por impedâncias.

A fórmula (2) nos diz ainda que P diminui e Q aumenta com o aumento da frequência:

$$P = P(f, |V|)$$

$$Q = Q(f, |V|) \quad (3)$$

As cargas compostas, que constituem a grande maioria das cargas reais, também variam com tensão e frequência e podem, portanto, ser escritas na forma da equação (3). No entanto, para esse tipo de carga, a relação funcional não pode, como regra geral, ser obtida analiticamente. O máximo que podemos esperar, numa situação prática, é estimar, medir ou determinar por algum método empírico a dependência com a tensão e a frequência.

Na maioria dos casos, práticos estamos interessados nas variações ΔP e ΔQ nas cargas ativas e reativas, causadas por variações pequenas em Δf e ΔV , na frequência e na tensão. Da equação (3), obtemos:

$$\Delta P \approx \left(\frac{\partial P}{\partial f} \right)_V \Delta f + \left(\frac{\partial P}{\partial |V|} \right)_f \Delta |V|$$

$$\Delta Q \approx \left(\frac{\partial Q}{\partial f} \right)_V \Delta f + \left(\frac{\partial Q}{\partial |V|} \right)_f \Delta |V| \quad (4)$$

Na expressão (4), as quatro derivadas parciais não podem ser determinadas analiticamente para cargas compostas. Elas devem ser encontradas empiricamente. Essas derivadas fazem o papel de parâmetros de carga, descrevendo na natureza da carga em torno dos níveis nominais de tensão e frequência. Elas variam muito com o caráter físico da carga. Assim, por exemplo, uma carga constituída principalmente por motores de indução tem parâmetros bem diferentes que os de outra, em que predominem equipamentos de aquecimento.

Vários estudos foram feitos sobre a dependência com a frequência e a tensão de uma carga composta "típica". Tomando uma média de vários desses estudos, definimos uma "carga média", como sendo a que possui a seguinte composição aproximada:

- Motores de indução – 60%
- Motores síncronos – 20%
- Outros "ingredientes" – 20%

Tal carga teria os seguintes parâmetros aproximados:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial |V|} &\approx 1,0 \\ \frac{\partial Q}{\partial |V|} &\approx 1,3 \quad (5) \\ \frac{\partial P}{\partial f} &\approx 1,0\end{aligned}$$

(não dispomos de $\frac{\partial Q}{\partial f}$, pois é de pouca importância).

Fazemos, então, as seguintes observações importantes:

Uma carga composta é caracterizada por uma dependência com a tensão muito menor do que a relativa a uma carga do tipo impedância (1% versus 2%).

Enquanto que uma carga constituída por uma impedância RL decresce com o aumento da frequência, de acordo com a equação (2), uma carga composta aumentará. Isso é devido à predominância de motores, cuja carga sempre aumentará com a frequência (e com a velocidade).

4.4.3) O BALANÇO DA POTÊNCIA ATIVA E SEUS EFEITOS SOBRE A FREQUÊNCIA DO SISTEMA

Existem pelo menos três boas razões pelas quais devemos manter as flutuações da frequência de um sistema dentro de limites rigorosos:

1. A maioria dos tipos de motores de corrente alternada gira com velocidades diretamente relacionadas com a frequência
2. É usado um grande número de relógios que operam eletricamente. Tais relógios são todos acionados por motores síncronos, sua exatidão é uma função não apenas do erro de frequência, mas realmente da integral desse erro.
3. O funcionamento global de um sistema de potência pode ser mais efetivamente controlado se mantivermos o erro de frequência dentro de limites rigoroso.

A primeira das razões acima não impõe restrições muito severas a flutuações de frequência. A maioria das cargas acionadas por motores de CA, provavelmente, não é sensível a flutuação da ordem de (60 ± 2) Hz.

As duas últimas razões são mais importantes. Variações incomuns na frequência de um sistema são uma indicação de que há algo errado com ele. Quando o sistema fica "doente" os indicadores de frequência funcionam como "termômetros clínicos". Reduzindo as flutuações

normais de frequência a uma débil ondulação, somos capazes de deletar perturbações de frequência, em seus estágios iniciais. Nos sistemas modernos, a constância da frequência é normalmente mantida nos limites de $\pm 0,05$ Hz.

4.4.4) MECANISMO CARGA-FREQUÊNCIA

Antes de explicar os meios para controlar a frequência de um sistema, comentaremos as razões pelas quais ela tende a variar.

A frequência está intimamente relacionada com o balanço de potência ativa na rede inteira. Sob condições normais de funcionamento, os geradores do sistema giram em sincronismo e juntos geram a potência que, a cada instante, está sendo consumida por todas as cargas e pelas perdas ativas na transmissão. Estas perdas, da ordem de poucos por cento, consistem em perdas ôhmicas nos vários componentes de transmissão, em perdas por efeito corona nas linhas e perdas nos núcleos dos transformadores e geradores. Devemos lembrar que a energia está sendo transmitida com velocidade da luz e, uma vez que, ela não está sendo armazenada (não levamos em consideração o armazenamento que corre nos elementos reativos) em nenhuma parte do sistema, concluímos que a taxa de produção de energia deve ser igual à taxa de consumo (mais perdas).

Devemos ressaltar que o funcionamento sincronizado dos geradores representa um estado estável do sistema. Uma vez que o gerador tenha sido sincronizado numa rede, aparecem forças eletromecânicas no interior da máquina, que tendem mantê-la girando na mesma velocidade que o resto da rede. Com a velocidade do gerador "amarrada" à do restante do sistema, podemos controlar a geração de potência ativa, controlando o conjugado aplicado ao gerador, pela máquina motriz. Abrindo a válvula de vapor e, portanto, aumentando a pressão do vapor nas lâminas da turbina ou, no caso de uma turbina hidráulica, abrindo as entradas de água aplicamos um conjugado maior aos geradores, tendendo, portanto, a acelerá-lo. No entanto, sua velocidade está presa à do resto do sistema e o que ocorre é que o rotor avança o seu ângulo de rotação uns poucos graus. Isso resulta num aumento na corrente e na potência fornecida e, ao mesmo tempo, a corrente cria um conjugado de desaceleração no interior da máquina, que é exatamente oposto ao aumento do conjugado de aceleração.

No interior de cada gerador temos um delicado mecanismo automático de balanceamento de conjugado. Se esse balanceamento fosse perfeito em todos os geradores, suas velocidades e sua frequência permaneceriam constantes. A maneira ideal de operar o sistema seria instruir os operadores de máquinas para regularem todas as entradas de água e válvulas de vapor, em valores que correspondam exatamente à demanda da carga. Teríamos então um perfeito balanceamento da potência ativa, com velocidade e frequência constantes. Porém, a carga do sistema pode ser prevista apenas dentro de certos limites. Suas flutuações são inteiramente

aleatórias, sendo impossível conseguir um perfeito equilíbrio instantâneo entre geração e demanda. Haverá sempre um pequeno excesso ou deficiência na geração e esse constante desequilíbrio causará flutuações de frequência.

Para entender esse fato, consideremos o que aconteceria se um sistema estivesse funcionando a 60 Hz, com perfeito equilíbrio de potência e, subitamente, experimentasse uma pequena diminuição na carga. A regulação das válvulas dos equipamentos de acionamento dos geradores permanece inalterada (uma vez que elas ignoram a mudança na carga), o que significa que os conjugados de acionamento não variam. A diminuição na carga resulta num decréscimo da corrente que seria distribuída por todos os geradores, acarretam do numa ligeira diminuição dos conjugados eletromecânicos de todas as máquinas. Todas elas experimentarão, portanto, um pequeno aumento no conjugado de acionamento, resultando num aumento de velocidade e frequência.

A taxa segundo a qual a velocidade e a frequência aumentaram depende do momento de inércia total do equipamento girante. Todos os milhares de motores que, nesse instante, estão sendo alimentados pela rede, também sofrerão o aumento de frequência, suas velocidades e seus conjugados crescerão e eles retirarão uma maior potência de toda rede. O aumento de carga resultante logo equilibrara a diminuição que iniciou essa longa cadeia de eventos e a frequência irá se elevar, atingindo um novo valor.

Essa inter-relação, carga-frequência trata-se de um dos mais importantes e básicos fenômenos num sistema de potência. O exemplo discutido é real, exceto uma parte, a regulação dos equipamentos de acionamento dos geradores não permanece fixo em face das variações de frequência. Por constituir-se num indicador sensível do balanço de energia no sistema, frequência deveria ser usada no sensor do sistema de controle, cuja finalidade seria promover tal balanço automaticamente.

4.4.5) O BALANÇO DA POTÊNCIA REATIVA E SEU EFEITO SOBRE A TENSÃO DO SISTEMA

Assim como a constância da frequência do sistema é a nossa melhor garantia de que o balanço da potência ativa está sendo mantido no sistema, um perfil constante de tensão de barra girante mostra que o equilíbrio está sendo mantido entre a potência reativa produzida e consumida. Sempre que o módulo de uma dada tensão de barra sofrer variações, isso significará que o balanço de Q não está sendo mantido na barra em questão.

Para entender essa situação, considere o sistema de duas barras da figura 11. A carga $P + jQ$ é alimentada pela barra de carga 2. Como não existe gerador nessa barra, a carga deve ser alimentada por meio da linha, a partir da barra 1.

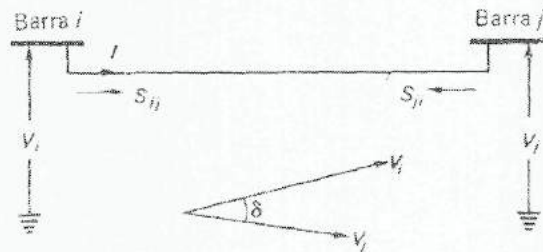


Figura 11

Para a análise que faremos, adotaremos as seguintes hipóteses:

1. A tensão da barra v_1 é mantida com módulo constante, por meio do constante de campo G_1 . Escolhemos v_1 como tensão de referência.
2. A impedância da linha de transmissão é puramente indutiva:

$$Z = j\chi_L \quad (11)$$

3. A potência da linha é igual a $P + jQ$. Uma vez que desprezamos a resistência da linha, isso não implica em aproximação, no que nos diz respeito a P . No entanto, devido às perdas reativas na reatância da linha a potência reativa é um pouco maior no terminal correspondente ao gerador.

Devido à queda de tensão ao longo da linha, temos a seguinte relação entre as tensões:

$$v_2 = v_1 - I.Z \quad (12)$$

A corrente de linha I é dada por:

$$v_1 I^* \approx P + j.Q \quad (13)$$

Logo:

$$I \approx \frac{P - j.Q}{v_1^*} = \frac{P - j.Q}{v_1} \quad (14)$$

A última passagem decorre da escolha de v_1 como fasor de referencia, isto é, $\delta_1 = 0$. Da equação (12), temos:

$$v_2 = v_1 - \frac{P - j.Q}{v_1} \cdot j.\chi = v_1 - \frac{\chi}{v_1} \cdot Q - j \cdot \frac{\chi}{v_1} \cdot P \quad (15)$$

Os três fasores são mostrados na figura 12. A figura 12 mostra a mudança no perfil de tensão como função do fluxo de potência reativa na linha.

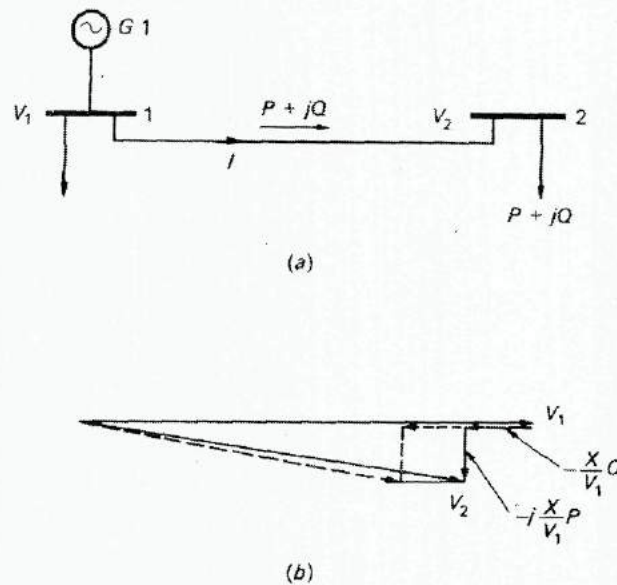


Figura 12

Concluimos do diagrama fasorial que:

1. Uma variação de potência ativa P afeta o fasor queda de tensão que é perpendicular a v_1 . Portanto, não ocorrerá nenhuma variação apreciável no módulo de v_2 .
2. Uma variação da potência reativa Q afeta o fasor queda de tensão que está em fase com v_1 . A variação no módulo de v_2 é, portanto, essencialmente proporcional a Q . (na figura 12 os fasores de tensão tracejados ilustram a variação v_2 se a potência reativa dobrar).

Se quisermos manter constante o módulo $|v_2|$, deveremos fazer com que as demandas variáveis de Q sejam compensadas localmente na barra 2, de modo que elas não necessitem ser transportadas pela linha, com os fortes efeitos que resultam sobre a tensão.

A geração local de Q pode ser conseguida por capacitores em paralelo e/ou capacitores síncronos. Lembrando que as cargas típicas são indutivas. Com o aumento da carga ativa segue-se um aumento da carga reativa. Existe, portanto, num sistema normal, a tendência de caírem as tensões durante períodos de pico de carga.

Feitos opostos ocorrem durante os períodos em que a carga é baixa. Devido à sempre presente capacitância em paralelo nas linhas, particularmente nos cabos, podemos realmente ter em nossas mãos um excesso de potência reativa. Isso significa que o fluxo de Q na figura 10

muda de sentido, os mesmo ocorrendo com fasor $\frac{X \cdot Q}{v_1}$, na figura 10-b, resultando na transformação da queda de tensão com o aumento de tensão.

Pode ser necessário, durante os períodos de carga baixa, ligar elementos consumidores de Q, isto é, reatores em paralelo, a certos pontos da rede, para evitar o crescimento exagerado da tensão.

Devemos também observar que não existe necessidade prática de uma rigidez excessiva em nossas exigências de constância de tensão.

Devemos controlar as tensões, pois praticamente todos os equipamentos usados num sistema de potência são projetados para funcionar num dado nível de tensão, chamado de tensão nominal ou tensão de placa. Se a tensão do sistema afastar-se desse valor, o desempenho desses equipamentos, bem como sua expectativa de vida caem. Por exemplo, o conjugado de um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão aplicada, o fluxo luminoso de uma lâmpada varia fortemente com a tensão etc.

São, portanto, fortes, os motivos que nos levam a controlar o nível de tensão num sistema de potência. Entretanto, não há necessidade de controlá-lo dentro de limites estreitos, como no caso da frequência (os valores são relativamente amplos). Na maioria das situações práticas toleramos maiores perfis de tensão no sistema de transmissão, durante as horas de baixa carga, do que nas horas de pico. Mudando a relação de transformação nos transformadores mais importantes, podemos compensar esse perfil variável da tensão primária e manter a tensão secundária constante, nos níveis do consumidor. Essa mudança de relação de transformação nos transformadores pode ser feita tanto de forma manual ou automática.

4.5) DESVANTAGENS NA TRANSMISSÃO DE ENERGIA EM CORRENTE ALTERNADA A ALTAS VOLTAGENS

4.5.1) EFEITO CORONA [6]

O efeito Corona ocorre quando um forte campo elétrico associado com um condutor de alta tensão ioniza o ar próximo ao condutor. O ar ionizado pode se tornar azul e se tornar audível em forma de "estalos". O efeito Corona também libera partículas de Oxigênio (O_2) e produz Ozônio (O_3), um gás corrosivo que destrói equipamentos de linhas de potência e coloca em perigo a saúde humana. Este efeito gera ruído eletromagnético de largo espectro. Geralmente, quanto maior a tensão, maior o efeito Corona. Este também aumenta com a umidade e chuva porque tornam o ar mais condutivo. O ruído de Corona induzido é geralmente pior durante a chuva, quando a precipitação cai em forma de gotas nas bordas inferiores das linhas de transmissão. A tentativa de localizar estas fontes raramente vale o esforço porque pouco pode ser feito para eliminá-lo.

Toda a energia liberada ou irradiada é proveniente do campo elétrico da linha, representando perda de energia e conseqüentemente prejuízo. De um modo geral, elas se relacionam com a geometria dos condutores, tensão de operação, gradientes de potencial nas superfícies dos condutores e, principalmente com as condições meteorológicas locais.

Nas transmissões em altas tensões ocorrem dois outros tipos de perturbação do meio provocada pelo efeito corona, sendo-lhes atribuído também caráter de poluição, a rádio interferência e o ruído acústico.

Mesmo em linhas com condutores bem dimensionados, quando as perdas por Corona, com tempo bom, são suficientemente pequenas para ser desprezadas para fins de determinação de parâmetros das linhas, o mesmo não acontecem condições de mau tempo.

4.5.2) EFEITO PELICULAR [7]

O efeito pelicular [5] é o fenômeno responsável pelo aumento da resistência aparente de um condutor elétrico em função do aumento da frequência da corrente elétrica que o percorre. À medida que a frequência da corrente aumenta a variação do campo magnético também aumenta. Para compensar o aumento da variação do campo magnético da corrente, aparece um campo elétrico, não conservativo, (E), como mostra a figura 13.

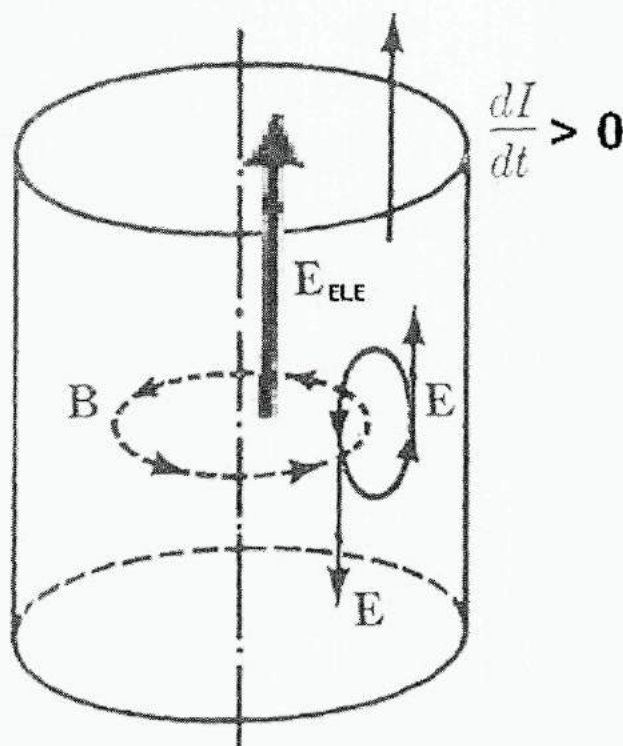


Figura 13

Este campo elétrico (E) reforça o campo elétrico da corrente elétrica (E_{ele}) na periferia do fio e enfraquece o campo elétrico da corrente elétrica no seu interior. Isto faz com que a corrente elétrica atravesse uma área menor e consequentemente ocorre um aumento da resistência do fio. A relação entre a área real do fio e sua área aparente é:

$$R_{CC} = \frac{\rho \cdot l}{S_{real}} \text{ e } R_{CA} = \frac{\rho \cdot l}{S_{aparente}} \quad (1)$$

Dividindo R_{CC} por R_{CA} , temos:

$$\frac{R_{CA}}{R_{CC}} = \frac{\frac{\rho \cdot l}{S_{aparente}}}{\frac{\rho \cdot l}{S_{real}}} = \frac{S_{real}}{S_{aparente}} \quad (2)$$

As figuras 14-a e 14-b mostram a área de um condutor:

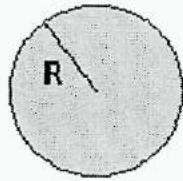


Figura 14-a

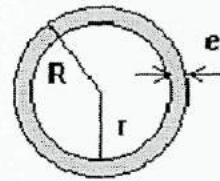


Figura 14-b

Na figura 14-a temos um condutor cilíndrico sendo percorrido por uma corrente contínua e na figura 14-b o mesmo condutor, porém percorrido por uma corrente alternada, se calcularmos as suas respectivas áreas teremos:

$$S_{real} = \pi \cdot R^2 \text{ e } S_{aparente} = \pi \cdot R^2 - \pi \cdot r^2 \quad (3)$$

Pela figura 14-b podemos ainda concluir que:

$$r = R - e \quad (4)$$

Substituindo os valores da equação (2) na equação (3) e levando em conta a equação (4), temos:

$$R_{CA} = \frac{\pi \cdot R^2}{\pi \cdot R^2 - \pi \cdot r^2} \cdot R_{CC} = \frac{R^2}{R^2 - (R - e)^2} R_{CC} \quad (5)$$

O valor e na equação é a profundidade de "skin", que pode ser calculada pela expressão:

$$e = \frac{3,16.e^3}{2.\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f.K_M}} \quad (6)$$

Onde ρ é a resistividade, f a frequência da linha e k_m a permeabilidade relativa.

Concluimos, pela equação (8), que a resistência AC de um determinado condutor aumenta à medida que aumenta o valor da frequência da corrente que percorre esse condutor.

Em interligação de longas distâncias (acima de 1000 km) as perdas em CA podem tornar-se elevadas, elevando os custos da transmissão. Isto ocorre por diferentes motivos, e um deles é que em corrente alternada a área ocupada pela corrente ao percorrer os condutores da linha de transmissão, devido ao efeito pelicular. O efeito pelicular pode ser observado no vídeo "resistência senoidal" no DVD que acompanha esta monografia.

4.6) TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA VOLTAGEM [8]

O sistema de transmissão de corrente contínua em alta tensão (CCAT, em inglês HVDC) pode ser utilizado para transmissão em massa de energia elétrica. O CCAT é a solução ideal para a transmissão econômica de energia em longas distâncias, e também uma forma confiável de conectar redes elétricas assíncronas ou de frequências diferentes. A transmissão em corrente contínua pode ser realizada de forma unipolar (um condutor, com retorno pelo terra) ou bipolar (dois condutores, de polaridades positiva e negativa). Um sistema de transmissão em corrente contínua com dois condutores metálicos equivale na prática a um circuito duplo de corrente alternada, dispondo da mesma confiabilidade e a um custo menor inclusive no que tange a uma menor utilização de faixas de passagem.

4.6.1) VANTAGENS DA TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA VOLTAGEM

A grande vantagem do sistema de transmissão em corrente contínua de alta tensão é a capacidade de transmitir grandes quantidades de energia a longas distâncias, com menores custos de capital e com perdas inferiores ao sistema de transmissão de energia em corrente alternada. Podendo então transmitir energia em massa a longos cursos de terminal para terminal, sem intermediários, por exemplo, em áreas remotas. Um fator determinante para a aplicação de CCAT é o baixo custo das linhas aéreas em corrente contínua. Acima de certa distância, a economia obtida nos cabos das linhas é maior do que os custos extras oriundos das estações terminais, tornando a opção de transmissão em corrente contínua vantajosa, ou seja, mesmo necessitando de estações conversoras para transmissão em áreas remotas a economia de cabos ainda é maior.

A transmissão de corrente contínua não é afetada pela capacitância e a indutância da linha. O sistema CC não introduz uma reatância da linha. Isso se traduz em maior capacidade de transferência de potência da linha (uma vez que apenas a força real é transmitida) e maior utilização da capacidade dos geradores. A queda de tensão também será reduzida ao longo da linha de transmissão.

O sistema de corrente contínua não produz o "efeito de Skin" nas linhas de transmissão.

No sistema de corrente contínua, a frequência é zero, portanto, nenhuma variação da frequência para monitorar. A ligação do gerador CC à rede de transmissão não irá mais exigir procedimentos de sincronização. Além disso, a estabilidade transitória durante a eliminação das falhas e mudanças não são mais um problema. É mais importante a "radiação" eletromagnética e interferências não são mais uma preocupação.

Nas transmissões subterrânea e submarina o sistema de corrente alternada é limitado devido aos efeitos do valor de corrente capacitiva dos cabos, o que não ocorrem em corrente contínua, mostrando assim grandes perspectivas para alimentação de grandes centros urbanos, transmissões submarinas e marítimas.

Todos os fatos mencionados anteriormente tem tornado cada vez maior o emprego da transmissão em corrente contínua no mundo.

Uma das desvantagens do sistema CCAT é que sua voltagem não pode ser transformada facilmente. Assim, para transmissão em corrente contínua, na fonte existem os geradores de voltagem alternada, a voltagem alternada é elevada por meio dos transformadores é que ela é retificada para ser transmitida. Ao chegar ao local de consumo, a corrente contínua deve ser transformada novamente em corrente alternada para que sua voltagem possa ser reduzida antes de ser distribuída. O preço do retificador eletrônico que transforma a corrente contínua em alternada é alto. A outra desvantagem é que ela não pode ser utilizada nas regiões entre o gerador a estação terminal.

CONCLUSÕES

Esta monografia visou contextualizar o estudo de correntes elétricas e potência, mostrando a sua aplicação no estudo de sistema de produção e transmissão de energia, tema de suma importância, pois no mundo de hoje é muito comum a utilização de energia elétrica nos afazeres cotidianos. A contextualização foi feita integrando os conceitos físicos aos conceitos específicos de sistema de transmissão, área de competência da engenharia de transmissão. Para tal foi necessário o estudo de termos específicos da área de engenharia e sua tradução para linguagem mais acessível para os professores que irão utilizar este material nos seus planos de aula. O intuito principal foi produzir um trabalho rico em informações acerca do tema, que seja capaz de instruir o professor dentro do campo da área de transmissão.

Devido à necessidade do conhecimento de cálculo integral e diferencial para se obter as relações relevantes no estudo de corrente alternada, foi necessário buscar outras formas de elucidação do tema. A solução encontrada foi a produção de vídeos didáticos, para traduzir os conceitos que envolvem este tema. Estes vídeos foram direcionados para os alunos do ensino técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Física volume 3; autor: Francisco Ramalho Júnior; editora: Moderna; 9ª edição,
- [2] Fundamentos de la teoria eletromagnética – Reitz Milford; Editora Campus; ano: 1982.
- [3] Física - vol. 3 eletromagnetismo; autor: Sears e Zeminanski; editora: Pearson; 12ª edição,
- [4] Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica – Olle I. Elgerd; editora: McGraw-Hill; ano: 1976,
- [5] Principles of Electrodynamics; autor: Aleksey Matveyev; editora: Dover Pubns; ano: 1966

Páginas da rede internacional de computadores que foram consultadas.

- [6] www.scribd.com
- [7] http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulomoises/Artigos_M%C3%A1quinas%5CEfeito%20pelicular%5Cskin.PDF
- [8] pt.wikipedia.org/wiki
- [9] <http://efisica.if.usp.br/electricidade/basico/>
- [10] http://www.dee.ufc.br/~rleao/Circuitos/CircII_2.pdf
- [11] <http://pt.scribd.com/doc/36135435/76/Potencia-no-Capacitor-Ideal>
- [12] <http://www.inf.unioeste.br/~rogerio/35f-Aplicacao-Fasores.pdf>
- [13] <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap1.html>
- [14] http://www.cp.com.br/upl/artigo_4.pdf
- [15] <http://www.eletrica.info/definicao-de-fator-de-potencia/>
- [16] <http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/275>

APÊNDICE

Questionário

- 1) Veja o vídeo "circuito RC-quadrada" e responda às seguintes perguntas:
 - a) Explique por que o capacitor oferece resistência à passagem de corrente elétrica do circuito?
 - b) O que acontece com a corrente elétrica neste circuito quando capacitor é ligado a um gerador de voltagem contínua?
- 2) Veja o vídeo "circuito RL-quadrada" e responda às seguintes perguntas:
 - a) Explique que tipo de resistência um indutor oferece à passagem de corrente elétrica do circuito?
 - c) O que acontece com a corrente elétrica neste circuito quando indutor é ligado a um gerador de voltagem contínua?
- 3) Veja o vídeo "circuito RC-senoidal" e responda às seguintes perguntas:
 - a) O que acontece com a corrente elétrica que atravessa o circuito quando a capacitância do capacitor aumenta?
 - b) O que acontece com a corrente elétrica que atravessa o circuito quando a frequência da onda senoidal aumenta?
 - c) Utilize os valores de C , R e f de um dos circuitos RC-senoidal do DVD e calcule a reatância indutiva e a impedância do circuito.
 - d) Calcule a corrente elétrica. Compare o valor calculado da corrente elétrica com o valor medido. Comente os seus resultados.
- 4) Veja o vídeo "circuito LC-senoidal" e responda às seguintes perguntas:
 - a) O que acontece com a corrente elétrica que atravessa o circuito RL-senoidal quando a indutância do indutor e a frequência da onda senoidal aumenta?
 - b) Utilize os valores de L , R e f de um dos circuitos RL-senoidal do DVD e calcule reatância indutiva e a impedância do circuito. Qual seria a variação relativa percentual da impedância se a resistência do circuito fosse nula?
 - c) Calcule a corrente elétrica. Compare o valor calculado com o valor medido. Comente os seus resultados.
- 5) É possível transformar voltagem com utilizando corrente contínua?
- 6) É possível transformar voltagem utilizando corrente alternada?
- 7) De que forma a relação entre o número de voltas das bobinas primária e secundária de um transformador influencia na transformação de voltagem?